

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАРДАХ ОЛЕКСАНДР ЮХИМОВИЧ

УДК 691.3:620.193

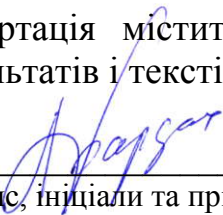
ДИСЕРТАЦІЯ

Довговічність бетону в умовах дії сульфатних розчинів і температури

05.23.05 - будівельні матеріали та вироби
19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


О.Ю. Бардах
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Савицький Микола Васильович, доктор технічних наук,
професор

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Бардах О.Ю. Довговічність бетону в умовах дії сульфатних розчинів і температури. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 - будівельні матеріали та вироби (19 – Архітектура та будівництво) – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2021.

У дисертаційній роботі викладено науково-обґрунтовані результати досліджень, спрямованих на розв'язання актуальної задачі забезпечення довговічності бетону в умовах дії сульфатних розчинів з урахуванням температури середовища.

Існуючі дослідження підтверджують, що проектування залізобетонних конструкцій з урахуванням зміни характеристик бетону під впливом корозійних процесів дозволяє підвищити ефективність антикорозійного захисту. Сульфатна корозія є складним процесом та залежить від багатьох факторів, які пов'язані зі мінералогічними характеристиками цементу, складом бетону, наявністю активних домішок, концентрацією агресивної речовини та температури середовища. Тим не менше, як норми по захисту залізобетонних конструкцій від корозії, так і наявні дослідження, не враховують вплив температури експлуатаційного середовища на інтенсивність протікання корозійних процесів.

На основі аналізу даних про сучасні методи моделювання процесу корозії та прогнозування довговічності бетону в умовах агресивного впливу сульфатних розчинів встановлено, що існуючі залежності не враховують вплив температури експлуатаційного середовища на кінетику корозійного процесу.

З використанням відомих досліджень та відомостей про механізм корозії бетону в рідких середовищах було запропоновано математичні

залежності, що описують кінетику процесу та розроблено алгоритм прогнозування зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища.

Особливості проникнення агресивних речовин враховуються шляхом введення ефективного коефіцієнту дифузії в твердому тілі, який відображає вплив параметрів структури бетону, а також температури на просування дифузійних іонів. На основі закону Арреніуса отримано залежність коефіцієнта дифузії іонів у водному розчині від температури та графіки залежності коефіцієнта дифузії сульфатів в бетоні від температури середовища. Встановлено, що коефіцієнт дифузії іонів сильно залежить від температури. При температурі близької до нуля, дифузія фактично відсутня. В інтервалах температури від 1 до 15 °C коефіцієнт дифузії інтенсивно збільшується. При значеннях 20-30 °C вплив температури на процес дифузії стає менш істотним. Для прогнозування зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища було розроблено алгоритм прогнозування зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища. В результаті чисельного експерименту отримані дані щодо розподілу концентрацій взаємодіючих речовин (сульфат-іонів, іонів кальцію, гідроалюмінату кальцію та зв'язаних сульфат-іонів) по глибині бетону від його зовнішньої поверхні.

Запропоновано математичну модель прогнозування руйнування захисного шару бетону продуктами корозії арматури. Встановлено зв'язок між геометричними параметрами конструкції, механічними властивостями бетону і ступенем корозії арматури, що викликає руйнування захисного шару. Призначення раціональної величини захисного шару бетону, заходи щодо забезпечення проектної величини захисного шару при виготовленні залізобетону і підвищення міцності при розтягуванні бетону в захисному шарі, поряд із щільністю бетону, мають вирішальне значення для підвищення довговічності залізобетонних конструкцій. Оцінка оптимальної величини захисного шару, зроблена виходячи з умов його руйнування накопичуються

продуктами корозії арматури, збігається з нормованими товщинами захисних шарів, що встановлюються на основі тривалої експлуатації залізобетонних конструкцій.

Проаналізовані та систематизовані основні фактори формування температурного режиму ґрунтів, які включають процесів надходження, переносу, акумуляції і віддачі тепла. Сформульовано рівняння теплового балансу ґрунту. Виходячи з відомих даних щодо повного теплового балансу поверхні ґрунту, запропоновано аналітичну розрахункову модель розподілу температури ґрунту по глибині, що включає довгохвильове випромінювання, короткохвильове випромінювання (сонячна радіація, що поглинається поверхнею), теплопровідність ґрунту (здатність ґрунту проводити теплоту від нагрітих шарів до холодних), конвективний теплообмін та ефект випаровування.

Для прогнозування довговічності бетону при сульфатній корозії в ґрунтах запропонована розрахункова модель розподілу температури ґрунту по глибині. З урахуванням розподілу температури по глибині ґрунту на прикладі м. Дніпро були отримані ізополя ушкодження захисного шару бетону через 10, 50 та 100 років експлуатації в умовах сульфатної корозії при концентрації SO_4^{2-} 15, 30 та 50 г/л та виконано оцінку зміни несучої здатності залізобетонної палі в умовах сульфатної корозії. Теоретична несуча здатність через 100 років експлуатації зменшується на 29 – 33,3% при концентрації $SO_4^{2-} = 15 – 50$ г/л, відповідно.

При проектуванні бетонних і залізобетонних конструкцій, призначених для експлуатації в агресивних середовищах, довговічність повинна забезпечуватися, головним чином, засобами первинного захисту. Критерієм забезпечення довговічності бетону в умовах сульфатної корозії є зниження міцності та руйнування захисного шару. У рідких агресивних середовищах стійкість бетону визначається його технологічними параметрами (мінералогічний склад цементного клінкеру, склад цементу та проникність бетону). Застосування заповнювачів з карбонатних порід за рахунок

особливостей їх фізико-хімічної взаємодії з цементом дозволяє отримати бетони підвищеної сульфатостійкості.

Приведені результати довготривалих експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону на карбонатних заповнювачах. В бетонних сумішах варіювався вміст карбонатного піску і пилоподібних частинок. Окремо було виготовлено серію зразків для порівняльного аналізу, які витримувались у воді. Проведено візуальне обстеження та випробування на стиск зразків через 30 років експонування в сульфатному розчині Na_2SO_4 з концентрацією 5% та воді. Встановлено, що через 30 років випробувань міцність на стиск зразків на карбонатному піску в 1.7 - 3.4 разів вище, ніж зразків на кварцовому піску. В результаті чисельного експерименту отримані дані щодо довговічності бетону на карбонатних заповнювачах з урахування температури середовища. Встановлено, що використання в якості заповнювача карбонатного піску веде до зменшення прогнозованої глибини ушкодження до 2.3 – 2.7 см при температурі 25°C та концентрації $\text{SO}_4^{2-} = 30$ г/л та 3.0 – 3.5 см при концентрації $\text{SO}_4^{2-} = 50$ г/л; відповідно, при температурі 15°C до 2.1 – 2.4 см та 2.7 – 3.1 см.

Чисельний експеримент з оцінки довговічності бетону на карбонатних заповнювачах з урахування температури середовища показав, що використання в якості заповнювача карбонатного піску веде до зменшення прогнозованої глибини ушкодження на 22 – 23 %.

На основі аналізу чинних норм щодо захисту залізобетонних конструкцій від корозії сформульовано вимоги до заходів по забезпеченню довговічності бетону в умовах сульфатної корозії залежно від характеристик агресивності середовища. Обґрунтування захисних заходів та вибору матеріалів для забезпечення довговічності бетону та залізобетону виконується шляхом техніко-економічного порівняння варіантів конструктивно-технологічних рішень з урахуванням прогнозованого терміну експлуатації та витрат на виконання антикорозійного захисту.

На прикладі улаштування пального фундаменту для малоповерхового індивідуального житлового будинку встановлено, що застосування бетону на карбонатному піску дозволяє знизити вартість бетону на його виготовлення на 8%, порівняно з використанням бетону на кварцовому піску, що підтверджує ефективність запропонованих заходів із забезпечення необхідної довговічності.

Ключові слова: довговічність, бетон, сульфатна корозія, температура.

SUMMARY

Bardakh O. Yu. **Durability of in the condition of the influence of sulphate solutions and temperature.** – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.23.05 – building materials and products (19 – Architecture and Civil Engineering). – State higher educational establishment «Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2021.

The thesis is devoted to the solution of actual problem of maintenance of durability of concrete in the conditions of sulphate corrosion taking into account temperature of environment.

Existing studies confirm that the design of reinforced concrete structures taking into account changes in the characteristics of concrete under the influence of corrosion processes can increase the effectiveness of corrosion protection. Sulfate corrosion is a complex process and depends on many factors related to the mineralogical characteristics of the cement, the composition of the concrete, the presence of active impurities, the concentration of the aggressive substance and the ambient temperature. Based on the analysis of data on modern methods of modeling the corrosion process and predicting the durability of concrete under aggressive exposure to sulfate solutions, it is established that the existing dependencies do not take into account the effect of environment temperature on the

kinetics of the corrosion process.

Using the well-known research and information on the mechanism of corrosion of concrete in liquid media, mathematical dependences describing the kinetics of the process were proposed and an algorithm for predicting changes in concrete strength during sulfate corrosion taking into account the ambient temperature was developed.

Features of penetration of aggressive substances are considered by introduction of effective coefficient of diffusion in a solid body which reflects influence of parameters of structure of concrete, and also temperature on advance of diffusion ions. Based on Arrhenius' law, the dependence of the diffusion coefficient of ions in liquid solution on temperature and the dependence of the diffusion coefficient of sulfates in concrete on the ambient temperature are obtained. It is established that the diffusion coefficient of ions strongly depends on temperature. At temperatures close to zero, diffusion is practically absent. In the temperature range from 1 to 15 °C the diffusion coefficient increases intensively. At values of 20-30 °C, the effect of temperature on the diffusion process becomes less significant. To predict the change in the strength of concrete during sulfate corrosion taking into account the temperature of the environment, an algorithm for predicting the change in the strength of concrete during sulfate corrosion taking into account the temperature of the environment was developed. As a result of the numerical experiment, data were obtained on the distribution of concentrations of interacting substances (sulfate ions, calcium ions, calcium hydroaluminate and bound sulfate ions) along the depth of concrete from its outer surface.

A mathematical model for predicting the destruction of the protective layer of concrete by reinforcement corrosion products is proposed. The dependences were obtained between the geometric parameters of the structure, the mechanical properties of concrete and the degree of corrosion of the reinforcement, which causes the destruction of the protective layer. The prescription of a rational value of the protective layer of concrete, measures to ensure the design value of the protective layer in the manufacture of reinforced concrete and increase the tensile

strength of concrete in the protective layer, along with concrete density, are crucial to increase the durability of reinforced concrete structures. Estimation of the optimal size of the protective layer, made on the basis of the conditions of its destruction of the accumulated corrosion products of reinforcement, coincides with the normalized thicknesses of the protective layers, which are installed on the basis of long-term operation of reinforced concrete structures.

The main factors of soil temperature regime formation, which include the processes of heat supply, transfer, accumulation and heat transfer, are analyzed and systematized. The equation of soil heat balance is formulated. Based on the known data on the total thermal balance of the soil surface, an analytical calculation model of soil temperature distribution over depth is proposed. The model considers long-wave radiation, short-wave radiation (solar radiation absorbed by the surface), soil thermal conductivity (soil heat dissipation), convective heat transfer and evaporation effect.

To predict the durability of concrete with sulfate corrosion in soils, a calculated model of soil temperature distribution by depth is proposed. Taking into account the temperature distribution along the depth of the soil on the example of Dnipro, isofields of damage to the protective layer of concrete after 10, 50 and 100 years of operation in conditions of sulfate corrosion at a concentration of 15, 30 and 50 g/l were obtained. The assessment of the load-bearing capacity of pile in the conditions of sulfate corrosion was conducted. Theoretical bearing capacity after 100 years of operation decreases by 29 - 33.3% at a concentration = 15 - 50 g / l, respectively.

When designing concrete and reinforced concrete structures intended for operation in aggressive environments, durability should be provided mainly by means of primary protection. The criterion for ensuring the durability of concrete in conditions of sulfate corrosion is a decrease in strength and destruction of the protective layer. In liquid aggressive environment, the durability of concrete is determined by its technological parameters (mineralogical composition of cement clinker, cement composition and permeability of concrete). The use of aggregates

from carbonate rocks due to the peculiarities of their physical and chemical interaction with cement allows obtaining concretes of high sulfate resistance.

The results of long-term experimental studies of corrosion resistance of concrete on carbonate aggregates are presented. The content of carbonate sand and dust particles varied in concrete mixtures. A series of samples for comparative analysis, which were kept in water, was prepared separately. A visual inspection and compression test of the samples after 30 years of exposure to a sulfate solution of Na_2SO_4 with a concentration of 5% and water. It was found that after 30 years of testing the compressive strength of samples on carbonate sand is 1.7 - 3.4 times higher than samples on quartz sand. As a result of the numerical experiment, data on the durability of concrete on carbonate aggregates were obtained considering the environment temperature. It was found that the use of carbonate sand as an aggregate leads to a decrease in the predicted depth of damage to 2.3 - 2.7 cm at a temperature of 25°C and a concentration $\text{SO}_4^{2-}=30$ g/l and 3.0 - 3.5 cm at a concentration $\text{SO}_4^{2-}=50$ g/l; respectively, at a temperature of 15°C to 2.1 - 2.4 cm and 2.7 - 3.1 cm. Numerical experiment was performed to assess the durability of concrete on carbonate aggregates based on the environment temperature and showed that the use of carbonate sand as an aggregate leads to a decrease in the predicted depth of damage by 22 - 23%.

Based on the analysis of current standards for the protection of reinforced concrete structures against corrosion, the requirements for measures to ensure the durability of concrete in conditions of sulfate corrosion, depending on the characteristics of the aggressiveness of the environment, were formulated. Substantiation of protective measures and choice of materials to ensure the durability of concrete and reinforced concrete is performed by technical and economic comparison of design and technological solutions, taking into account the estimated service life and the cost of corrosion protection.

On the example of laying a pile foundation for a low-rise individual house, it was found that the use of concrete on carbonate sand reduces the cost of concrete

for its manufacture by 8% compared to the use of concrete on quartz sand, which confirms the effectiveness of the proposed measures to ensure durability.

Keywords: durability, concrete, sulphate corrosion, temperature.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бардах А. Е., Никифорова Т. Д., Савицкий Н. В., Матюшенко И. Н., Назаренко А. О. Инженерная методика расчета прочности и деформаций железобетонных конструкций заглубленных зданий с учетом сульфатной коррозии бетона. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* Днепропетровск, 2010. Вып. 56. С. 299–304.

2. Бардах А. Е., Лаухина Л. Н., Савицкий Н. В. Функция условий работы железобетонных конструкций в агрессивных сульфатных средах. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения.* Днепропетровск, 2011. Вып. 58. С. 429–435.

3. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Матюшенко И. Н., Никифорова Т. Д. Расчет открытой пористости бетона при агрессивном воздействии сульфатов в зависимости от вида цемента. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* Днепропетровск, 2012. Вып. 65. С. 517–520.

4. Bardah A. E., Savytskyi N. V., Shekhorkina S. E. Floating buildings review and design approaches. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Создание высокотехнологичных социоэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития.* Днепропетровск, 2013. Вып. 68. С. 376-381.

5. Бардах А.Е., Савицкий Н.В., Шехоркина С.Е., Амир Алани, Карим Лимам. Экспериментальное исследование коррозионной стойкости бетона на карбонатных заполнителях. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2013. Вып. 69. С. 446-450.

6. Бардах О. Ю., Савицкий М. В., Нікіфорова Т. Д., Шляхов К. В. Инженерный метод розрахунку міцності згинальних залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепр, 2017. Вып. 100. С. 48–55.

7. Bardakh O., Savytskyi M., Uncik S., Savytskyi A., Shevchenko T., Savytskyi O. Quantitative design methods for protection against corrosion of reinforced concrete structures during various stages of their lifecycle. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 28 (3). P. 8–12. URL: <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0018> (*Web of Science*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Bardakh O., Savytskyi M., Savytskyi A., Shevchenko T., Chernets V. Quantitative design methods of corrosion protection the reinforced concrete structures at the stages of the lifecycle. *Proceedings of the enviBUILD 2019*. 2020. P. 153–158. URL: <https://doi.org/10.2478/9788395669699-025>.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Никифорова Т. Д. Новая конструкция поперечного армирования в зоне продавливания монолитной плиты плоского перекрытия колонной. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2007. Вып. 43. С. 477–481.

10. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Никифорова Т. Д., Шляхов К. В., Несин А. А. Вариантное проектирование сборно-монолитного каркаса многоэтажных зданий социального назначения. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2008. Вып. 47. С. 534–537.

11. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Бауск Е. А., Матюшенко И. Н., Несин А. А., Сопильняк А. М. Усиление строительной конструкции здания РДЭС энергоблоков № 1, 2 РАЭС. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2014. Вып. 77. С. 177–181.

12. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Елисеева М. А., Кузьмин Г. И., Новиченко Н. В., Евсеев Е. О. Прочность грунтобетонов в зависимости от состава смеси. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2015. Вып. 82. С. 179–186.

13. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Елисеева М. А., Новиченко Н. В. Факторы, влияющие на качество грунтобетонов. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Создание высокотехнологичных социоэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. Днепропетровск, 2015. Вып. 81. С. 177–184.

14. Bardah A. E., Koval' E. A., Savitskiy N. V. Energy saving and ecological aspects in housing construction. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпропетровськ, 2008. № 4-5. С. 51–52.

15. Методология создания устойчивых экопоселений в Украине / Бабенко М. М., Бардах А. Е., Бондаренко О. И., Данишевский В. В., Коваль А. С., Конопляник А. Ю., Никифорова Т. Д., Николаенко С. Н.,

Мирошниченко К. К., Савицкий А. Н., Савицкий Н. В., Шатов С. В., Шевченко Т. Ю., Шехоркина С. Е.; под. общ. ред. Н. В. Савицкого. Днепр: Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры, РоялПринт, 2017. 304 с.

16. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3Д-друку будівельних об'єктів: колективна монографія / М. Савицький, Ш. Айріх, І. З. Халаф, С. Дукач, С. Унчік, Г. Євсєєва, Т. Нікіфорова, С. Шатов, О. Адегов, М. Бабенко, Є. Бринзін, О. Голубченко, О. Зінкевич, С. Іванцов, О. Коваль, О. Конопляник, М. Ляховецька–Токарєва, М. Махінько, І. Перегінець, О. Савицький, А. Титюк, Є. Юрченко, Т. Шевченко, С. Шехоркіна, К. Шляхов, О. Бондаренко, О. Бардах, М. Бордун, О. Денисенко, О. Лясота, А. Савицький, Є. Соловійова, В. Спірідоненков, В. Чернець; за заг. ред. М. Савицького. Дніпро: ФОП Удовиченко О.М., 2019. 233 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ В УМОВАХ СУЛЬФАТНОЇ КОРОЗІЇ	22
1.1 Основні принципи та вимоги проектування залізобетонних конструкцій за критерієм довговічності	22
1.2 Сучасні уявлення про сульфатну корозію бетону	24
1.3 Аналітичний опис та математичне моделювання процесу сульфатної корозії бетону	31
1.4 Методи прогнозування довговічності бетону в умовах сульфатної корозії	36
1.5 Прогнозування довговічності залізобетону при корозії арматури	39
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	48
РОЗДІЛ 2 ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ В УМОВАХ СУЛЬФАТНОЇ КОРОЗІЇ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА	50
2.1 Математична модель сульфатної корозії бетону з урахуванням температури експлуатаційного середовища	50
2.2 Ефективний коефіцієнт дифузії сульфат-іонів в бетоні з урахуванням температури експлуатаційного середовища	53
2.3 Прогнозування міцності бетону в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури експлуатаційного середовища	61
2.4 Теоретичні дослідження кінетики процесу та зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища	64
2.5 Вплив міцності бетону і товщини захисного шару на довговічність залізобетону	69
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	83
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДА ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ ЗАХИСНОГО ШАРУ ПРИ СУЛЬФАТНІЙ КОРОЗІЇ В ҐРУНТАХ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ СЕРЕДОВИЩА	85

3.1 Фактори формування температурного режиму ґрунтів	85
3.2 Розробка аналітичної моделі розподілу температури ґрунту по глибині	87
3.3 Результати моделювання розподілу температури в ґрунті (на прикладі м. Дніпро)	93
3.4. Прогнозування довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті з урахуванням температури середовища	97
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	106
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ В УМОВАХ СУЛЬФАТНОЇ КОРОЗІЇ З УРАХУВАННЯМ TEMПЕРАТУРИ СЕРЕДОВИЩА	108
4.1 Теоретичне обґрунтування заходів підвищення довговічності бетону в умовах сульфатної корозії	108
4.2 Довготривалі експериментальні дослідження корозійної стійкості бетону на карбонатних заповнювачах	110
4.2.1 Методика експериментальних досліджень	110
4.2.2 Результати довготривалих експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону на карбонатних заповнювачах	115
4.3 Оцінка довговічності бетону на карбонатних заповнювачах з урахуванням температури середовища	124
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	130
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ СУЛЬФАТНОЇ КОРОЗІЇ З УРАХУВАННЯМ TEMПЕРАТУРИ СЕРЕДОВИЩА	132
5.1 Забезпечення довговічності бетону в умовах сульфатної корозії	132
5.2 Техніко-економічна ефективність антикорозійного захисту залізобетонних конструкцій в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури середовища	136
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5	141
ВИСНОВКИ	142

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	144
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача	158
ДОДАТОК Б Довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи	162

ВСТУП

Актуальність теми. Бетон і залізобетон є одними з найпоширеніших будівельних матеріалів, які використовуються для спорудження будівель і споруд різноманітного призначення. Значна кількість залізобетонних конструкцій експлуатується в агресивних умовах, серед яких вагоме місце займають рідкі середовища з розчинами солей (хлориди, сульфати, карбонати та ін.). Агресивним впливом на бетон і залізобетон характеризуються морські, річкові, озерні та ґрунтові води. В Україні наявні всі перелічені типи рідких агресивних середовищ. Води Чорного та Азовського морів, річки, що впадають у них, а також ґрунтові води степових територій характеризуються присутністю сульфат-, хлор- та магній-іонів. Тому застосування залізобетонних конструкцій потребує заходів із забезпечення необхідної довговічності з урахуванням впливу агресивного середовища.

Згідно з діючими нормами, довговічність конструкцій рекомендується забезпечувати вживанням корозійностійких матеріалів, добавок, що підвищують корозійну стійкість бетону, зниженням проникності бетону, встановленням вимог за тріщиностійкістю, товщиною захисного шару бетону.

Залізобетонні конструкції, які запроектовано і виготовлено відповідно до вимог чинних нормативних документів, повинні мати достатню стійкість до дій, що спричиняють корозію бетону. Проте такі норми носять рекомендаційний характер і не містять кількісних характеристик для оцінювання процесу корозії.

Існуючі дослідження підтверджують, що проектування залізобетонних конструкцій з урахуванням зміни характеристик бетону під впливом корозійних процесів дозволяє підвищити ефективність антикорозійного захисту. На сьогодні вже розроблено ряд математичних моделей для опису кінетики сульфатної корозії бетону. З використанням цих моделей

запропоновано методики прогнозування довговічності залізобетонних конструкцій в рідких середовищах.

Сульфатна корозія є складним процесом та залежить від багатьох факторів, які пов'язані з мінералогічними характеристиками цементу, складом бетону, наявністю активних домішок, концентрацією агресивної речовини та температурою середовища. Тим не менше, як норми з захисту залізобетонних конструкцій від корозії, так і наявні дослідження не враховують вплив температури експлуатаційного середовища на інтенсивність протікання корозійних процесів.

Виходячи з аналізу існуючих даних і моделей визначення довговічності бетону і залізобетону під впливом агресивних сульфатних розчинів, розроблення математичної моделі для опису процесу розвитку сульфатної корозії з урахуванням температури середовища і його впливу на довговічність конструкції є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження, викладені в дисертації, виконані згідно з напрямом наукової діяльності кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій ДВНЗ ПДАБА, відповідно до науково-дослідних робіт: «Створення методології раціонального проектування ресурсозберігаючих архітектурно-конструктивно-технологічних систем для будівництва доступного житла» (№ держреєстрації (ДР) 0111U000455, 2011-2012 рр.), «Розробка наукових засад створення високотехнологічних соціоекокомплексів в Україні на основі концепції стійкого розвитку» (№ ДР 0113U00129, 2013-2014 рр.), «Розробка наукових засад трансформації будівель та житлових комплексів сучасних великих міст України на основі інноваційних екотехнологій» (№ ДР 0115U000218, 2015–2016 рр.), «Розробка наукових основ інноваційної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку» (№ ДР 0119U100608, 2019-2020 рр.), у яких здобувач брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток наукових положень прогнозування довговічності бетону та залізобетону в умовах дії сульфатних розчинів з урахуванням температури середовища.

Для досягнення мети поставлені та вирішені такі завдання дослідження:

- аналіз існуючих математичних моделей сульфатної корозії бетону та методів прогнозування довговічності бетону в умовах сульфатної корозії;
- удосконалення математичної моделі сульфатної корозії бетону шляхом врахування температури середовища;
- розроблення методу прогнозування довговічності бетону захисного шару при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища;
- експериментально-теоретичні дослідження впливу карбонатних заповнювачів на сульфатостійкість бетону;
- дослідження техніко-економічних показників антикорозійного захисту залізобетонних конструкцій в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури середовища.

Об'єкт дослідження – корозійні процеси в бетоні залізобетонних конструкцій в умовах дії сульфатних розчинів з урахуванням температури середовища.

Предмет дослідження – довговічність бетону залізобетонних конструкцій в умовах дії сульфатних розчинів з урахуванням температури середовища.

Методи дослідження: аналізу та синтезу, математичного моделювання, методи експериментальних досліджень, методи техніко-економічної оцінки.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено математичну модель сульфатної корозії бетону з урахуванням температури середовища (*отримано вперше*);
- запропоновано аналітичну модель розподілу температури ґрунту по глибині та отримано дані щодо довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті (*отримано вперше*);
- одержано експериментальні дані про довговічність бетону в умовах сульфатної корозії та вплив карбонатних заповнювачів на сульфатостійкість бетону (*отримало подальший розвиток*);
- отримані дані щодо залежності кінетики сульфатної корозії бетону від характеристик зовнішнього середовища (концентрації, температури та тривалості впливу) та параметрів бетону (хіміко-мінералогічний склад, вид заповнювача) (*отримало подальший розвиток*).

Практичне значення отриманих результатів. На основі проведених досліджень запропоновано методика прогнозування довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті з урахуванням температури середовища.

Результати досліджень можуть використовуватися в проектних організаціях, при проектуванні і призначенні параметрів бетону захисного шару залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в рідких агресивних середовищах.

Результати досліджень використані в навчальному процесі ДВНЗ «ПДАБА» при підготовці здобувачів вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» за освітньою програмою «Промислове та цивільне будівництво» при викладанні спеціального курсу «Раціональне проектування залізобетонних конструкцій».

Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих в співавторстві: сформульовано математичні залежності, що описують кінетику сульфатної корозії, та основні положення оцінювання міцності бетону при сульфатній корозії [1, 2, 6, 7, 8]; виконано оцінювання впливу

конструктивно-технологічних параметрів бетону на його довговічність [3]; виконано аналіз експериментальних даних про довговічність бетону в умовах сульфатної корозії та вплив складу суміші на сульфатостійкість бетону [5, 11, 12]; сформульовано вимоги до конструкцій, що експлуатуються в рідких агресивних середовищах [4, 13, 14]; розроблено конструктивні рішення залізобетонних конструкцій з урахуванням вимог щодо довговічності [8, 9, 10, 15, 16].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференціях і семінарах: Міжнародній науково-практичній конференції «Створення високотехнологічних соціоекокомплексів в Україні на основі концепції збалансованого (стійкого) розвитку» (м. Алушта, 2013 р.); 14-тій Міжнародній конференції «enviBUILD 2019» (м. Братислава, Словаччина, 2019 р.).

Публікації. Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи відображені в 16 наукових працях, у тому числі 6 статтях у наукових фахових виданнях України, 1 статті у закордонному фаховому виданні, яке включено до наукометричної бази Web of Science, 1 публікації, яка засвідчує апробацію матеріалів дисертації, та 8 публікаціях, які додатково відображають наукові результати дисертації (6 статтях у наукових фахових виданнях України, 2 колективних монографіях).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 118 найменувань, двох додатків. Повний обсяг дисертації становить 164 сторінки, обсяг основного тексту – 4,625 авторських аркуша. Список використаних джерел викладено на 14 сторінках. Додатки представлено на 7 сторінках. Робота містить 44 рисунки та 48 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ В УМОВАХ СУЛЬФАТНОЇ КОРОЗІЇ

1.1 Основні принципи та вимоги проектування залізобетонних конструкцій за критерієм довговічності

Довговічність - властивість матеріалу зберігати необхідні якості до появи граничного стану, тобто протягом всього періоду експлуатації, при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Довговічність матеріалу залежить від температури, типу і концентрації середовища, рівня навантаження, виду напруженого стану, тривалості дії експлуатаційних факторів; визначається часом або числом циклів від початку експлуатації до моменту досягнення граничного стану.

Довговічність бетону і залізобетону як конструкційних матеріалів означає, що при відповідності умов експлуатації проектним будівельні елементи протягом всього передбаченого терміну служби будуть стійкі до агресивних впливів. Тому при використанні бетону і залізобетону в умовах дії агресивних середовищ виникає проблема визначення і забезпечення їх довговічності.

Бетонні і залізобетонні конструкції найбільш часто піддаються дії рідких і газоподібних середовищ, ступінь дії яких визначається:

- для газоподібних середовищ - видом і концентрацією газів (група газів) і температурно-вологісним режимом приміщень або зоною вологості території;
- для рідких середовищ - наявністю і концентрацією агресивних агентів (сульфатів, хлоридів), температурою, величиною напору або швидкістю руху рідини на поверхні конструкції.

Залежно від показників агресивності середовища визначається ступінь її дії на бетон, призначаються характеристики матеріалу, визначається необхідність введення добавок.

В рідких середовищах (морських, річкових, ґрунтових, промислових водах) містяться розчини солей-електролітів, агресивних до бетону і залізобетону: хлориди, сульфати, карбонати і ін. Морська або річкова вода руйнує бетон гідротехнічних та портових споруд, причалів.

Агресивні ґрунтові води впливають на бетон підземних частин будівель та споруд (фундаментів, підпірних стін тощо).

У степових зонах, особливо в районах поширення засолених ґрунтів, у складі ґрунтових вод часто присутні сульфат-, хлор- та магній-іони. Такі ґрунти на території України наявні в дельтах деяких причорноморських річок, по берегах лиманів і мілководних заток Сивашу.

Агресивні сульфат-іони взаємодіють з бетоном, результатом чого є утворення нових речовин значного об'єму, що призводить до поступового руйнування бетону захисного шару. Таким чином, ґрунтові води мають сульфатну агресивність по відношенню до бетону.

Проектування залізобетонних конструкцій з урахуванням агресивності середовища на сьогоднішній день здійснюється за вимогами ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [1] та СНиП 3.03.11-85 (в частині пунктів 2.44, 2.47-2.61) [2]. Дані норми для забезпечення необхідної довговічності регламентують вживання первинного і вторинного захисту. Первинний захист здійснюється шляхом підвищення стійкості залізобетону, застосуванням добавок, що підвищують корозійну стійкість бетону і його захисні властивості по відношенню до сталеві арматури, зниженням проникності бетону технологічними прийомами і виконанням конструктивних вимог (встановлення вимог до категорії за тріщиностійкістю, ширині розрахункового розкриття тріщин, товщині захисного шару бетону). Вторинний захист від корозії передбачає ізоляцію поверхонь конструкції від контакту із зовнішнім середовищем шляхом нанесення спеціальних покриттів.

Застосування того або іншого виду захисту регламентується залежно від виду і ступеня агресивності середовища, класифікація яких приводиться в нормах [1]. Тим не менше, питання забезпечення довговічності майже завжди неявно інтегровані у стандарти, тому проектувальник не має належного розуміння того, наскільки ефективними будуть ті чи інші заходи для забезпечення необхідного терміну служби в реальних умовах. Зокрема, в нормах не вказаний термін дії первинного і вторинного захисту. В результаті заходи щодо забезпечення довговічності бетону можуть бути необґрунтованими та призводити до здорожчання будівництва або до дострокової втрати експлуатаційних характеристик конструкцій у випадку недостатнього захисту.

Багаточисельні дослідження [3-5] підтверджують, що проектування залізобетонних конструкцій з урахуванням кінетики корозійних процесів і характеристик бетону, що змінюються під впливом агресивного середовища, дозволяє підвищити ефективність антикорозійного захисту конструкцій. На сьогодні вже існує ряд методик та алгоритмів для прогнозування довговічності та раціонального проектування залізобетонних конструкцій в рідких та газоподібних середовищах [6-8].

Виходячи з вищевикладеного, розробка та удосконалення розрахункових методів визначення довговічності є необхідною для підвищення ефективності застосування бетону і залізобетону в конструкціях, які піддаються агресивній дії середовища.

1.2 Сучасні уявлення про сульфатну корозію бетону

Глибокі дослідження, присвячені розкриттю механізму корозії бетону в сульфатних середовищах та розробці ефективних складів бетонів при дії агресивних впливів, виконані такими вченими як І. Є. Ахвердов [9], В.І. Бабушкін [10], Г.К. Демент'єв [11], Є.А. Гузеєв [12-15], Ф.М. Іванов [16-19], В. Е. Москвін [20], А.Ф. Полак [21, 22], Н. К. Розенталь [23],

Т. В. Рубецька [24, 25], Р.Ф. Рунова [26, 27], В.В. Троян [26, 28, 29], М.Ф. Тихомирова [30], С.В. Шестоперов [31], Федосов С. В., Базанов С. М. [32], М.В. Савицький [3, 4], Л.О. Шейніч [33-35], М.І. Нетеса [36-38] та ін.

Сучасні уявлення про механізми процесу сульфатної корозії бетону узагальнені в роботах [20, 39, 40].

Найбільш вивченими є закономірності сульфатної корозії бетону при дифузійному механізмі масопереносу. Визначальними параметрами процесу є кількість пор бетону, їх форма, звивистість, замкнутість і т.д., а також концентрація агресивних компонентів в розчині. Як показали дослідження В.А. Гузеєва, В.М. Москвіна та ін. [41, 42] істотним є вплив напруженого стану бетону на його проникність.

Руйнування бетону при сульфатній корозії обумовлено взаємодією сульфат-іонів з гідроксидом кальцію і гідроалюмінатами кальцію з утворенням гіпсу, еtringіта і моногідросульфоалюміната кальцію [39]. Обсяг новоутворень збільшується в 2,34 ... 4,8 рази (при реакціях в рідкій фазі) і в 5,1 рази (при реакціях в твердій фазі). Це викликає розвиток внутрішніх напружень і утворення тріщин.

Сульфатні розчини, що зустрічаються в природі, іноді містяться в ґрунті або розчиняються в підземних водах. Сульфати можуть впливати на бетон, реагуючи з гідратованими сполуками в затверділому цементі. Ці реакції можуть викликати достатній тиск для руйнування цементного каменю, що призводить до втрати когезії та міцності. Сульфат кальцію взаємодіє з гідроалюмінатом кальцію і утворює еtringіт. Сульфат натрію реагує з гідроксидом кальцію та гідратом алюмінату кальцію, утворюючи еtringіт та гіпс.

Умови навколишнього середовища мають великий вплив на сульфатну корозію. Негативний вплив збільшується у бетоні, який піддається багаторазовим циклам зволоження/висушування або заморожування/танення.

Коли вода випаровується, сульфати можуть накопичуватися на поверхні бетону, збільшуючи концентрацію та потенціал для погіршення

технічного стану. Пориста структура бетону робить його сприйнятливим до впливів, викликаних кристалізацією солей. Приклади солей, які, як відомо, спричиняють руйнування бетону, включають карбонат натрію та сульфат натрію.

Ушкодження, спричинені сульфатною корозією, можуть бути, пов'язані з втратою міцності, розширенням та відшаруванням. Тверді солі не впливають на бетон, але в розчинах можуть реагувати з гідратованим цементом. Найбільш поширеними розчинами є сульфати натрію (Na), калію (K), магнію (Mg) та кальцію (Ca). Походження сульфатів є природним у підземних водах, проте вони також можуть походити від добрив та промислової діяльності.

Бетон в умовах впливу сульфатів має характерний білуватий вигляд, пошкодження, як правило, починаються з країв і кутів, за чим слідують тріщини та відшарування бетону. Причиною таких проявів є те, що суть сульфатної корозії полягає в утворенні сульфату кальцію (гіпс) та сульфоалюмінату кальцію (етрингіт), причому обидва продукти займають більший обсяг, ніж той, яким вони замінюють, що призводить до розширення та руйнування затверділого бетону.

До продуктів взаємодії агресивного середовища і цементного каменю, в першу чергу, відносяться еtringіт і таумасіт.

Коли еtringіт утворюється в свіжоприготованій бетонній суміші, а його розподіл є відносно гомогенним, він не є причиною руйнування бетону. Такий тип еtringіту, відповідно до міжнародної класифікації називається первинним. Прикладом утворення первинного еtringіта є реакція двуводного гіпсу з трьохкальцієвим алюмінатом в присутності води:



У процесі цієї реакції еtringіт адсорбується на поверхні цементних зерен, перешкоджаючи проникненню до них води і адгезії цементного гелю і виступаючи, таким чином, в якості регулятора термінів схоплювання.

З іншого боку, коли еtringіт утворюється в набагато більш пізні терміни (протягом декількох місяців або навіть років), виникає неоднорідна експансія в бетонній структурі, що призводить до появи мікротріщин і розвитку процесів корозії.

Згідно із міжнародною класифікацією такий еtringіт називається вторинним. Руйнування бетону в результаті утворення вторинного еtringіта, залежить від концентрації реагуючих компонентів на ділянках структури бетону і кристалічної форми новоутворень.

Інші продукти реакцій взаємодії сульфатів зі складовими цементу приведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Продукти реакцій взаємодії сульфатів зі складовими цементу

Експлуатаційне середовище	Активні компоненти цементного каменю	Продукт реакції
CaSO ₄	4CaO·Al ₂ O ₃ ·13H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ 12H ₂ O	CaSO ₄ ·2H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ 12H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ 32H ₂ O
Na ₂ SO ₄	Ca(OH) ₂ 4CaO·Al ₂ O ₃ ·13H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ 12H ₂ O	CaSO ₄ ·2H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ 12H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ 32H ₂ O
MgSO ₄	Ca(OH) ₂ 3CaO·2SiO ₃ ·nH ₂ O 4CaO·Al ₂ O ₃ ·13H ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ 12H ₂ O	CaSO ₄ ·2H ₂ O Mg(OH) ₂ ·nH ₂ O 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ 12H ₂ O

Ілюстрація бетону, ушкодженого внаслідок сульфатної корозії, приведена на рис. 1.1, 1.2 [44, 48].



Рисунок 1.1 - Ілюстрація бетону, ушкодженого внаслідок сульфатної корозії



Рисунок 1.2 – Характер тріщиноутворення і руйнування бетону внаслідок сульфатної корозії

Протікання сульфатної корозії залежить від наявності $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і СЗА в гідратованому цементі, тобто, хімічний склад в'язучого відіграє важливу роль у стійкості до сульфатів. Цементи з низьким вмістом СЗА мають вищу сульфатостійкість, оскільки зменшується імовірність утворення

гідросульфоалюмінату кальцію (ГСАК) під дією сульфатів. Також довговічність бетону можна підвищити шляхом застосування сульфатостійких цементів або спеціальних добавок. Залежність швидкості руйнування бетону від вмісту цементу та кількості СЗА проілюстрована на рис. 1.3 [44].

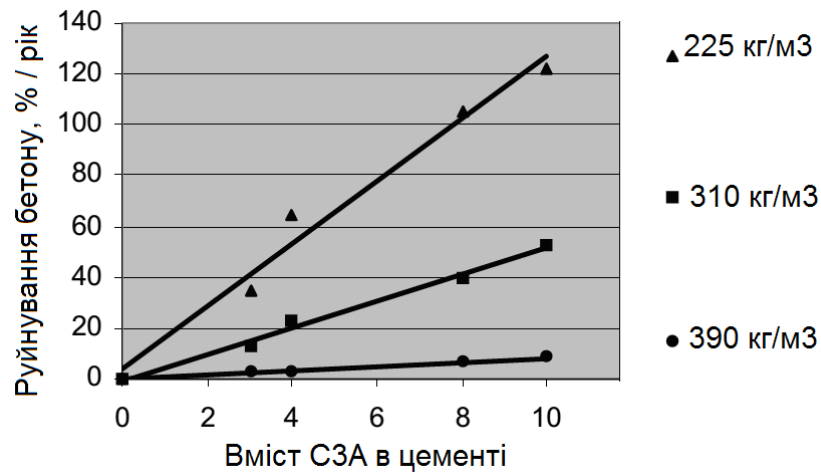


Рисунок 1.3 – Залежність швидкості руйнування бетону від вмісту цементу та кількості СЗА [44]

На сульфатостійкість цементного каменю і бетону впливають параметри бетону, середовища і умов їх взаємодії. Найбільший практичний інтерес представляє визначення засобів первинного захисту, що підвищують сульфатостійкість бетонів.

Сульфатостійкість цементного каменю і бетону обумовлена, перш за все, його хімічною активністю. Хімічна активність цементного каменю і бетону визначається вихідним складом цементного клінкеру, тонкістю помолу цементу, вмістом гіпсу і мінеральних добавок в цементі і ін.

Основний вплив на утворення ГСАК визначає трикальцієвий гідроалюмінат (СЗА). Загальновизнаним є твердження про те, що обмеження змісту в клінкері цементу СЗА підвищує його сульфатостійкість [49-52].

Додавання гіпсу в цемент не тільки регулює його терміни схоплювання, а й підвищує сульфатостійкість цементного каменю шляхом зв'язування частини С3А у вигляді ГСАК в процесі тверднення [10, 16, 53].

Експериментально встановлено, що при впливі сульфатних розчинів белітові цементи, що містить знижену кількість С3S, більш стійкі в порівнянні з алітовими цементами [54]. При гідратації алітових портландцементів утворюється значна кількість вільного гідроксиду кальцію, з якого, при впливі сульфат-іонів, утворюється гіпс. З огляду на вищенаведене, стандарти [1, 2] в сульфатостійких цементах поряд з С3А обмежують кількість С3S.

Практично помітна кількість ГСАК починає утворюватися при концентрації сульфатів в розчині понад 250 мг/л. Утворення двуводного гіпсу відбувається при концентрації понад 1 055 мг/л [55].

Кінетика утворення ГСАК і гіпсу визначається загальним вмістом продуктів гідратації цементу, здатних вступати у взаємодію з сульфат-іонами, а також їх подальшого розчинення. Їх кількість регулюється вихідним вмістом мінералів цементу, а також введенням добавок, здатних зв'язати мінерали в процесі гідратації цементного каменю або подальшого розчинення продуктів гідратації.

Великий вплив на довговічність бетону в сульфатних середовищах має його структура, яка обумовлює ступінь доступності внутрішньої поверхні бетону (проникність), а також створює умови для розміщення продуктів корозії [56-62]. Певне значення при розробці сульфатостійких бетонів має вибір виду наповнювачів.

Сучасні цементи дають можливість швидкого набору міцності, за рахунок збільшення вмісту трикальцієвого силікату С3S. Збільшення вмісту С3S призводить до збільшення вмісту гідроксиду кальцію в затверділому цементі, тим самим підвищуючи сприйнятливість до сульфатної корозії. Крім вмісту С3А, співвідношення С3S / С2S в цементі суттєво впливає на сульфатостійкість цементних сумішей.

Додавання мінеральних домішок, таких як мелений гранульований шлак, зола, діоксид кремнію та ін., до бетонної суміші, підвищує стійкість бетону до дії сульфатів. Вища ефективність суміші з домішками порівняно із звичайним цементним бетоном пояснюється пуцолановою реакцією, яка споживає гідроксид кальцію, та розбавленням фази алюмінат-гідратів кальцію завдяки зменшенню кількості звичайного цементу від загальної кількості в'язучого.

Співвідношення води та в'язучого є головним фактором, який контролює розвиток міцності бетону. Бетон з меншим водоцементним співвідношенням в основному щільніший і має вищу міцність.

Погіршення стану бетону при впливі сульфатів залежить від концентрації сульфатів в розчині. Більша концентрація сульфатів призводить до більш швидкого руйнування бетону.

Фізичні характеристики розчину сульфату, пов'язані з його температурою, та рівень занурення бетону, також впливають на швидкість руйнування. Підвищення температури розчину сульфату прискорює інтенсивність корозії.

Таким чином, сульфатна корозія є складним процесом та залежить від багатьох факторів, які пов'язані зі мінералогічними характеристиками цементу, складом бетону, наявністю активних домішок, концентрацією агресивної речовини та температури середовища, що в комплексі обумовлює складність її аналітичного опису та математичного моделювання з метою прогнозування довговічності бетону.

1.3 Аналітичний опис та математичне моделювання процесу сульфатної корозії бетону

Різноманіття факторів і складність процесів, що впливають на кінетику сульфатної корозії визначили, в основному, емпіричний характер залежностей для опису закономірностей сульфатної корозії бетону.

Для прогнозування довговічності бетону з урахуванням кінетики сульфатної корозії, необхідно користуватися залежностями, які описують поглинання цементним каменем сульфат-іонів, а також встановлюють зв'язок між фізико-механічними характеристиками бетону і кількістю поглинутих сульфат-іонів.

Такою характеристикою процесу сульфатної корозії, як показано в роботах [4, 51] є зв'язані цементним каменем сульфат-іони.

На сьогоднішній день запропоновано ряд моделей для опису кінетики накопичення зв'язаних цементним каменем сульфат-іонів [12, 51, 63, 65]. Шляхом статистичного узагальнення результатів експериментальних досліджень в роботах [3, 4] запропонована модель розрахунку поля концентрації пов'язаних сульфат-іонів з урахуванням визначальних чинників.

В роботах [63, 64] автори пропонують математичну модель накопичення сульфат-іонів:

$$Q_{so_3} = Q_{so_3,u} \left[1 - \exp \left[- \frac{h}{h + a_n} (a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot w/c + a_3 \cdot C_0) \right] \right], \quad (1.1)$$

де $Q_{so_3,u}$ - критичний вміст сульфат-іонів в бетоні, %:

t - час впливу середовища, місяці;

w/c - водоцементне співвідношення;

C_a - концентрація розчину, г/л;

h - глибина, мм;

a_i - коефіцієнти ($i = 0 \dots 4$).

При розв'язку рівняння (1.1) отримуються результати, що суперечать експериментальним даним. Так, згідно з (1.1) зв'язані цементним каменем сульфат-іони, хоча і в малих кількостях, можна виявити на скільки завгодно великій відстані від місця контакту бетону з середовищем через як завгодно

малі проміжку часу, тобто фронт взаємодії має необмежені розміри. Залежність дає результат, при якому в будь-якому середовищі відсутні ознаки руйнування, тобто в крайовому шарі встановлюється кількість зв'язаних сульфат-іонів, але не вище критичного значення - $Q_{SO_3, u}$. Недоліком залежності (1.1) є також і те, що в ній не враховується ряд важливих параметрів, що визначають швидкість сульфатної корозії бетону (C3F, C3S та ін.).

Є. А. Гузеєв [12] узагальнив результати досліджень сульфатної корозії бетону і запропонував емпіричні залежності для опису моделі сульфатної корозії бетону на період утворення гіпсу та розрахунку кількості зв'язаних цементним каменем сульфат-іонів бетону, серед яких:

$$Q_{SO_3} = \frac{d \cdot W \cdot n(C_3A)C_s}{y} \left[1 - \exp(-0,05\sqrt{\gamma t}) \right]^\beta, \quad (1.2)$$

де d - параметр режиму середовища;

W - водопоглинання бетону, %;

$n(C_3A)$ - вміст C3A в цементі;

C_s - концентрація SO_4^{2-} в розчині, г/л;

y - глибина шару бетону в елементі, для якого виконується розрахунок, см;

t - час прогнозування, роки;

γ, β - коефіцієнти.

Результати розрахунку досить точно збігаються з експериментальними даними, але є значний запас, оскільки залежності (1.2) були отримані на основі непередставницьких даних. Залежність (1.2) справедлива тільки для часу прогнозування не менше 10 років і не більше 30 років.

Також М. В. Савицьким [3, 4], була запропонована загальна математична, модель корозії бетону, що описується системою рівнянь:

$$\frac{\partial C_{ai}}{\partial t} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_{a,i}(S, T, \tau, C_{a,h,k}, \dots) \frac{\partial C_{a,i}}{\partial x_j} \right] -$$

$$- K_{i,\ell}(H, T, \tau, \dots) \prod_{i=1}^M C_{a,i}^{\alpha i} \cdot \prod_{\ell=1}^L C_{h,\ell}^{\beta \ell} ; \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial C_{h,\ell}}{\partial t} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_{h,\ell}(S, T, \tau, C_{a,h,k}, \dots) \frac{\partial C_{h,\ell}}{\partial x_j} \right] -$$

$$- \chi_{b,\ell} K_{i,\ell}(H, T, \tau, \dots) \prod_{\ell=1}^M C_{a,i}^{\alpha \ell} \cdot \prod_{\ell=1}^L C_{h,\ell}^{\beta \ell} , \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial C_{ah,k}}{\partial t} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_{ah,k}(S, T, \tau, C_{ah,k}, \dots) \frac{\partial C_{ah,k}}{\partial x_j} \right] -$$

$$- \chi_{i,\ell} K_{i,\ell}(H, T, \tau, \dots) \prod_{\ell=1}^M C_{a,i}^{\alpha \ell} \cdot \prod_{\ell=1}^L C_{h,\ell}^{\beta \ell} , \quad (1.5)$$

де $C_{a,i}, C_{\beta,\ell}, c_{ab,k}$ - відповідно, концентрація i -го активного компоненту агресивного середовища; l -го активного компоненту бетону; k -го продукту взаємодії;

$$D_{a,i}(S, T, \tau, C_{ah,k}, \dots), \quad D_{h,i}(S, T, \tau, C_{ab,k}, \dots), \quad D_{ah,i}(S, T, \tau, C_{ah,k}, \dots) \quad -$$

ефективні коефіцієнти дифузії i -го компонента агресивного середовища, l -го компонента бетону, k -го продукту взаємодії;

$K_{i,\ell}(H, T, \tau, \dots)$ - константа швидкості хімічної реакції i -го компонента агресивного середовища і l -го активного компонента бетону;

$\chi_{b,\ell}, \chi_{i,\ell}$ - стехіометричний коефіцієнт;

S - структурні параметри бетону;

H - характеристика хімічної активності бетону;

T - температура;

τ - напруження;

x_j - просторові координати;

t - час.

Розподіл зв'язаних сульфат-іонів по глибині бетону та його зміну протягом часу в роботі [66] пропонується визначати з використанням залежностей:

при $c_{SO_3}(z=0, t) \leq c_{SO_3, u}$:

$$c_{SO_3}(z, t) = c_{SO_3}(z=0, t) \left[1 - \frac{z}{z_f(t)} \right]^\lambda; \quad (1.6)$$

при $c_{SO_3}(z=0, t) > c_{SO_3, u}$:

$$c_{SO_3}(z, t) = \begin{cases} c_{SO_3, u}, & \text{при } z \leq z_{f_2}(t) \\ c_{SO_3, u} \left[1 - \frac{z - z_{f_2}(t)}{z_f(t)} \right]^\lambda, & \text{при } z_{f_2}(t) < z < z_f(t) + z_{f_2}(t) \end{cases}, \quad (1.7)$$

де $c_{SO_3}(z=0, t)$ - концентрація зв'язаних цементним каменем сульфат-іонів в крайовому поверхневому шарі;

z - поточна координата, що відраховується від крайового волокна перерізу;

t - тривалість впливу розчину, що містить сульфати;

$z_f(t)$ - ширина фронту взаємодії, за виключенням зруйнованих шарів;

$z_{f_2}(t)$ - глибина зруйнованих шарів;

λ - показник ступеню, за допомогою якого можна варіювати розподіл зв'язаних сульфат-іонів;

$c_{SO_3, u}$ - гранична кількість SO_3 , при якій бетон повністю втрачає міцність.

Залежності (1.6) і (1.7) відображають основні особливості процесу сульфатної корозії бетону, які полягають в тому, що фронт впливу сульфат-іонів і активних компонентів цементного каменю має обмежені розміри; ширина його змінюється в часі; кількість зв'язаних цементним каменем сульфат-іонів зменшується по глибині.

Проте приведені залежності не враховують вплив температури середовища на кінетику корозійного процесу. Великий обсяг залізобетонних конструкцій експлуатуються в ґрунті, температура якого змінюється по глибині та значною мірою залежить від кліматичних умов. Необхідна розробка аналітичних залежностей для врахування впливу даних особливостей на інтенсивність корозійних процесів та дослідження довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті.

1.4 Методи прогнозування довговічності бетону в умовах сульфатної корозії

Основна причина ушкоджень конструкцій з бетону при сольовій формі корозії - руйнування бетону від дії внутрішніх напружень, що виникають внаслідок прояву кристалізаційного тиску зростаючих в порах кристалів солей.

Особливо небезпечні випадки, коли в порах бетону кристалізуються спочатку безводні шари, а потім, при появі відповідних умов, вони перетворюються в кристалогідрати [20, 21]. Такі перетворення супроводжуються значним збільшенням обсягу твердої фази і виникненням внутрішніх напружень в тілі бетону.

Для прогнозування поведінки бетонних і залізобетонних конструкцій в умовах сульфатної агресивності середовища необхідно мати залежності, що описують поглинання цементним каменем сульфат-іонів, а також встановлюють зв'язок між фізико-механічними характеристиками бетону і кількістю накопичених сульфат-іонів.

Ф.М.Іванов і ін. [19, 20] на основі експериментальних досліджень зробив висновок, що процес хімічного зв'язування сульфатів в цементному камені бетону підпорядковується загальній закономірності для гетерогенних процесів при односторонній дифузії:

$$x = \sqrt{2Dc_0t} \cdot k \quad (1.8)$$

де x - товщина шару продуктів корозії;

D - коефіцієнт дифузії;

c_0 - концентрація сульфат-іонів;

t - час;

k - коефіцієнт пропорційності.

Для прогнозування кінетики сульфатної корозії бетону в роботі [51] запропонована залежність:

$$sk = \eta_0 \eta_{C_3A} \eta_p \eta_t, \quad (1.9)$$

де sk - ступінь корозії бетону у відсотках зв'язаного SO_3 від маси цементу;

η_0 , η_{C_3A} , η_p , η_t - відповідно, функціональні залежності швидкості корозії від концентрації SO_4^{2-} в розчині, вміст C_3A в портландцементі, вміст активної домішки в цементі, час дії сульфатного розчину.

Для оцінки міцності бетону при впливі сульфатних розчинів в роботі [15] запропоновано формулу для опису накопичення зв'язаних сульфат-іонів в структурі бетону:

$$R_{bs}(t) = R_b [A - a \exp(BQ_{SO_3})], \quad (1.10)$$

$$R_{ws}(t) = R_w [A - a \exp(BQ_{SO_3})], \quad (1.11)$$

де $R_{bs}(t)$, $R_{ws}(t)$ - призмova міцність бетону, відповідно, в розчинах сульфатів та у воді;

Q_{SO_3} - кількість зв'язаних SO_3 , г/л цементу;

a, A, B - константи.

Аналогічний вираз приведено в роботах В.М. Борисенко [67, 68]:

$$R_{bs}(t) = R_b \gamma_{BS}, \quad (1.12)$$

де γ_{BS} - коефіцієнт, що дорівнює

$$\gamma_{BS} = \begin{cases} 1, & \text{при } Q_{SO_3} < 2\% \\ 1, 1 - 0,1 \exp(0,17 Q_{SO_3}) & \text{при } 2\% > Q_{SO_3} < 14\% , \\ 0, & \text{при } 14\% < Q_{SO_3} \end{cases} \quad (1.13)$$

У роботах [69] для опису послідовних стадій зміни стану бетону запропоновано використовувати прийом розчленування процесу сульфатної корозії на деякі умовно «прості» процеси. При цьому допущенні, вплив окремих факторів на міцність бетону в умовах повного занурення в агресивний розчин описується залежністю:

$$R_b(z, t) = \gamma_{Ba}(z, t) \cdot \gamma_{Bg}(z, t) \cdot \gamma_{BS}(z, t) \cdot R_b, \quad (1.14)$$

де $R_b(z, t)$ - міцність бетону в зоні, що розглядається;

$\gamma_{Ba}(z, t)$ - коефіцієнт умов роботи, що враховує вплив адсорбційного ефекту;

$\gamma_{Bg}(z, t)$ - коефіцієнт умов роботи, що враховує вплив процесу гідратації цементного каменю;

$\gamma_{BS}(z, t)$ - коефіцієнт умов роботи, що характеризує вплив процесу сульфатної корозії на зміну міцності бетону.

В результаті експериментальних досліджень М. В. Савицьким [4] отримано рівняння, що описує залежність між відносною зміною міцності бетону в воді і кількістю зв'язаних цементним каменем сульфат-іонів:

$$\gamma_{BS} = 1 + 0,004Q_{SO_3}(z=0,t)(6 - Q_{SO_3}(z=0,t)). \quad (1.15)$$

де Q_{SO_3} - кількість зв'язаних SO_3 , г/л цементу;

Пізніше в роботі [5] отримані наступні залежності:

$$\gamma_{BS} = 1 + 0,005Q_{SO_3}(z=0,t)(1 - 0,14Q_{SO_3}(z=0,t)), \quad (1.16)$$

де γ_{BS} - коефіцієнт умов роботи, що характеризує вплив процесу сульфатної корозії на зміну міцності бетону;

$Q_{SO_3}(z=0,t)$ - кількість зв'язаних цементним каменем сульфат іонів в перерахунку на SO_3 , %.

Не дивлячись на велику кількість існуючих математичних моделей для оцінки зміни міцності бетону при впливі сульфат-іонів, даних щодо впливу конструктивно-технологічних параметрів на ефективність антикорозійного захисту наразі недостатньо для прийняття обґрунтованих рішень на практиці. Отже, необхідне дослідження кінетики сульфатної корозії бетону та проведення оцінки техніко-економічних показників залізобетонних конструкцій в залежності від характеристик зовнішнього середовища (концентрації, температури та тривалості впливу) та параметрів бетону (хіміко-мінералогічний склад, вид заповнювача).

1.5 Прогнозування довговічності залізобетону при корозії арматури

Існує дві основні схеми розвитку процесів корозії арматури в залізобетонних конструкціях.

Для першої характерно те, що корозія арматури починається після руйнування захисного шару бетону. Основною причиною пошкодження конструкції є недостатня стійкість бетону.

Корозія за другою схемою починається з арматури, коли бетон не володіє достатніми пасивуючими властивостями і в той же час не руйнується під дією середовища.

В цьому аспекті виділяються наступні критерії для прогнозування довговічності залізобетонних конструкцій:

- зниження несучої здатності, внаслідок зменшення діаметра арматури і погіршення зчеплення її з бетоном;
- руйнування захисного шару бетону, обумовлене тиском плівки продуктів корозії сталі.

В багатьох роботах, присвячених впливу корозії арматури на довговічність залізобетону, виходячи з вимог нормативної літератури [1, 2], моментом настання граничного стану вважається момент депасивації арматури. Час до початку корозії визначається періодом карбонізації захисного шару на всю його товщину або досягнення концентрації агресивних іонів граничного значення [70, 71].

В роботі [72] була запропонована модель визначення напружено - деформованого стану бетону, яка є поєднанням моделей навантаження конструктивного елемента, дії агресивного середовища (карбонізації та хлоридної агресії) і моделі корозійного зносу арматури. Автори обмежуються дослідженням стиснутих залізобетонних елементів та визначають напруження σ_δ в бетоні, ґрунтуючись на діаграмі деформації бетону:

1) при впливі тільки карбонізації

$$\sigma_\delta = A_0\varepsilon - B_0\varepsilon^3, \quad (1.17)$$

де ε - деформація бетонного зразка;

A_0, B_0 - коефіцієнти, які визначаються за кривими деформування бетонних зразків після карбонізації;

2) при одночасному впливі хлоридної агресії та карбонізації:

$$\sigma_{\delta} = A_0 \chi_1(\mu) \psi_1(C_{Cl}) \varepsilon - B_0 \chi_2(\mu) \psi_2(C_{Cl}) \varepsilon^3, \quad (1.18)$$

де $\chi_j(\mu)$ - функція впливу карбонізації;

$\psi_2(C_{Cl})$ - функція впливу хлоридної агресії, $j = 1, 2$;

C_{Cl} - концентрація хлоридів.

Модель корозійного зношування арматури автори приймають у вигляді:

$$\delta = \begin{cases} 0, & t \leq t_{inc} \\ a(t - t_{inc})^b, & t > t_{inc} \end{cases}, \quad (1.19)$$

де δ - глибина корозії арматури;

t_{inc} - інкубаційний період, значення якого визначається окремо для впливу лише карбонізації, лише іонів Cl^- та для їх спільної дії;

a, b – коефіцієнти.

Запропоновані залежності можуть бути використані для прогнозування напружено-деформованого стану тільки стиснутих конструкцій з урахуванням глибини корозійного ураження арматури, але не визначає його вплив на величину напружень в бетоні.

Прогнозування терміну служби залізобетонної конструкції до початку корозії арматури в умовах карбонізації і хлоридної агресії можна здійснювати за схемою, запропонованою в роботі [73]. Розрахунок розбивається на наступні етапи:

- визначається мінімальна товщина захисного шару з умови, що вона - нормально розподілена величина;
- визначається глибина карбонізації бетону захисного шару;

- на підставі перших двох пунктів визначається час, через який відбудеться повна карбонізація захисного шару в області його мінімальної товщини;
- визначають концентрацію хлорид-іона на деякій глибині захисного шару (зокрема, в приарматурній зоні) в заданий період часу від початку експлуатації конструкції;
- будується часовий ряд, якому у відповідність ставиться ряд значень глибини карбонізує і ряд концентрацій хлор-іона в приарматурному шарі;
- у ряду концентрацій хлор-іона знаходять значення критичних концентрацій, характерні для некарбонізованого бетону, і за таблицею визначають строки досягнення цих концентрацій;
- отримані значення порівнюють і визначають час до початку корозії арматури.

Термін служби конструкції визначається з умови, що утворення продуктів корозії на арматурі, що приводить до розтріскування і руйнування захисного шару, настає через 2-4 роки після початку корозії сталі, хоча даний період може варіюватися залежно від умов експлуатації, складу агресивного середовища і т.д.

В роботі [75] критерієм граничного стану по довговічності запропоновано вважати критичну величину розкриття поздовжньої тріщини в захисному шарі бетону, викликаної корозією арматури в зоні максимальних напружень. Захисний шар розглядається у вигляді балки прямокутного перетину, навантаженої в прольоті і жорстко закріпленої на опорах.

Переміщення захисного шару, який віджимається арматурою, що кородує, прийняті $f = 2\Delta$. В припущенні, що між розкриттям тріщини w і середньою товщиною Δ шару, який прокородував, існує лінійна залежність, був отриманий час корозії арматури до утворення тріщини певної ширини розкриття:

$$t = \frac{w_k l \rho}{8 c v}, \quad (1.20)$$

де w_k - ширина розкриття поздовжньої тріщини, м;

l - довжина ділянки захисного шару, яка розглядається, м;

ρ - густина металу, кг/м³;

c - товщина захисного шару, м;

v - швидкість корозії арматури, г/м² за рік;

t - час корозії арматури до утворення тріщини певної ширини розкриття.

Швидкість корозії визначається за формулою:

$$v = \frac{(m_1 - m_2)}{A}, \quad (1.21)$$

де m_1 и m_2 – маса арматурного стержню до і після корозії, відповідно (кг);

A – площа поверхні стержня (м²).

Вираз (1.15) визначає миттєву швидкість корозії і не враховує можливість її зміни в часі. Дана модель не враховує вплив агресивного середовища, умови експлуатації конструкції.

Таким чином, основними недоліками розглянутих моделей є те, що, хоча у багатьох випадках конструкція продовжує експлуатуватися в умовах корозії арматурної сталі, вони не описують характер і кінетику процесів утворення шару продуктів корозії на поверхні арматури і не визначають момент початку утворення тріщин в бетоні захисного шару в результаті тиску продуктів корозії.

Для визначення часу до руйнування бетону внаслідок корозії арматури була запропонована модель Bazant [71]. Основні припущення, зроблені в даній роботі:

- стадія корозії арматури починається у момент її депасивації;

- корозійне руйнування бетону відбувається в результаті утворення червоної іржі ;
- густина продуктів корозії в 4 рази нижче густині арматурної сталі.

Час до утворення тріщин визначається по формулі:

$$t_{cr} = \rho_{cor} \frac{D \cdot \Delta D}{S \cdot j_r}, \quad (1.22)$$

де ρ_{cor} - приведена густина сталі та продуктів корозії;

$$\rho_{cor} = [(1/\rho_r) - (0.523/\rho_{st})]^{-1} \frac{\pi}{2}, \quad (1.23)$$

де D – діаметр арматури;

ΔD - збільшення діаметра арматури внаслідок утворення продуктів корозії;

S – периметр поперечного перетину арматури;

j_r - швидкість утворення продуктів корозії.

Схожа емпірична модель була запропонована в роботі [72]. Тривалість корозії арматури до настання граничного стану визначається:

$$t_{corr} = \frac{Q_{cr}}{j_r}, \quad (1.24)$$

де j_r - швидкість утворення продуктів корозії (грамм/день);

Q_{cr} - кількість продуктів корозії в момент утворення тріщин;

$$Q_{cr} = 0.602D \left(1 + \frac{2C}{D}\right)^{0.85} \quad (1.25)$$

де C - товщина захисного шару, m .

Недоліком вищеназваних моделей є те, що швидкість корозії арматури визначається шляхом статистичної обробки вже наявних даних або в розрахунках пропонується використовувати її миттєве значення без урахування характеру і ступеня агресивності середовища, що спричиняє за собою значні погрішності. Дані моделі не були підтверджені експериментально. Значення, отримані в реальних умовах були значно більше, ніж період до початку утворення тріщин, визначений по (1.16) і (1.18).

Для визначення величини тиску іржі на бетон в роботах [77-79] запропонована модель. Бетон розглядається як товстостінний циліндр з розташованим всередині арматурним стержнем. Схематично запропонована модель зображена на рис. 1.4.

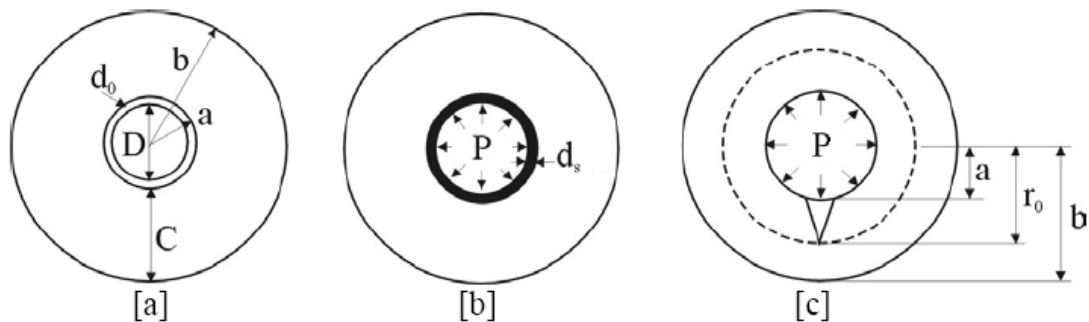


Рисунок 1.4 – Модель для визначення величини тиску продуктів корозії на захисний шар бетону.

На рис. 1.4:

$a = (D + 2d_0)/2$ - внутрішній радіус бетонного циліндра;

$b = C + (D + 2d_0)/2$ - зовнішній радіус бетонного циліндра;

C – товщина захисного шару бетону; товщина захисного шару бетону;

D – діаметр арматури; діаметр арматури;

d_s - товщина шару продуктів корозії;

d_0 – товщина шару пор бетону на межі з поверхнею арматури;

P – тиск шару продуктів корозії на бетон.

Тиск продуктів корозії на оточуючий арматуру бетон визначається на основі теорії пружності [77-79] як радіальні напруження в будь-якій точці поперечного перетину циліндра за формулою:

$$P = \frac{2E_{ef}d_s}{(D + 2d_0) \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_c \right)} \quad (1.26)$$

де ν_c - коефіцієнт Пуассона для бетону;

E_{ef} - ефективний модуль пружності бетону, який визначається за формулою:

$$E_{ef} = E_c / (1 + \varphi_{cr}), \quad (1.27)$$

де E_c - модуль пружності бетону;

φ_{cr} - коефіцієнт повзучості бетону;

В роботі [77] на основі формули (1.20) була отримана залежність для визначення кількості продуктів корозії на поверхні арматури, яка спричинить напруження, що перевищуватимуть опір бетону на розтяг.

Кількість продуктів корозії відповідно до даного підходу складається з двох частин:

- кількості продуктів корозії, необхідне для заповнення всіх взаємозв'язаних пір бетону, що примикають до поверхні арматури;
- кількості продуктів корозії, яка викличе критичні розтягуючі напруження.

Автором була отримана максимально можлива товщина продуктів корозії:

$$d_s = \frac{CR_{bt}}{E_{ef}} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_c \right), \quad (1.28)$$

де C – товщина захисного шару, m ;

E_{ef} - ефективний модуль пружності бетону, $MПа$;

R_{bt} - міцність бетону на розтяг, $MПа$.

Час до утворення тріщин у захисному шарі бетону визначається як:

$$t_{cr} = \frac{W_{crit}^2}{2k_p}, \quad (1.29)$$

де $k_p = 2.59 \cdot 10^{-6} (1/\alpha) \pi D i_{cor}$ - ступінь корозійних втрат металу;

α - коефіцієнт, який характеризує тип продуктів корозії;

D – діаметр арматури;

i_{cor} - густина току корозії, яка визначається з використанням вимірювальних приладів;

W_{crit} - кількість продуктів корозії, які викликають утворення тріщин в бетоні:

$$W_{crit} = \rho_{rust} \left(\pi [d_s + d_0] D + \frac{W_{st}}{\rho_{st}} \right); \quad (1.30)$$

d_s - товщина шару продуктів корозії;

d_0 - товщина слою пор;

ρ_{rust} , ρ_{st} - густина продуктів корозії та сталі, відповідно;

W_{st} - маса сталі на погонний метр.

Корозія арматури в бетоні є комплексним процесом і характеризується одночасним протіканням декількох хімічних реакцій; швидкість даних

процесів залежить від концентрації агресивних речовин і властивостей бетону та оточуючого середовища, які можуть змінюватися в часі. Норми проектування повністю виключають можливість корозії арматури, тоді як в реальних умовах експлуатації дані процеси нерідко виникають і призводять до зниження довговічності конструкції. Існуючі моделі не враховують викладені вище особливості корозійного процесу арматури.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Бетонні і залізобетонні конструкції часто піддаються дії рідких середовищ, які за рахунок наявності розчинених солей характеризуються агресивним впливом на бетон. Серед наявних на території України рідких агресивних середовищ, особливу небезпеку несуть води Чорного та Азовського морів, а також ґрунтові води степових територій з присутністю сульфат-іонів. Для забезпечення необхідної довговічності залізобетонних конструкцій необхідна розробка захисних заходів із урахуванням впливу агресивного середовища.

2. Сульфатна корозія є складним процесом та залежить від багатьох факторів, які пов'язані зі мінералогічними характеристиками цементу, складом бетону, наявністю активних домішок, концентрацією агресивної речовини та температури середовища, що в комплексі обумовлює складність її аналітичного опису та математичного моделювання з метою прогнозування довговічності бетону. Існуючі залежності не враховують вплив температури експлуатаційного середовища на кінетику корозійного процесу, а також вплив корозії арматури на довговічність бетону.

3. Великий обсяг залізобетонних конструкцій експлуатується в ґрунті, температура якого змінюється по глибині та значною мірою залежить від умов оточуючого середовища. Необхідна розробка аналітичних залежностей для врахування впливу даних особливостей на інтенсивність

корозійних процесів та дослідження довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті.

4. Для розробки ефективних заходів щодо забезпечення довговічності бетону при сульфатній корозії необхідне проведення експериментальних досліджень впливу активних заповнювачів на основі карбонатних порід на сульфатостійкість бетону.

5. Необхідне дослідження кінетики сульфатної корозії бетону та проведення оцінки техніко-економічних показників залізобетонних конструкцій в залежності від характеристик зовнішнього середовища (концентрації, температури та тривалості впливу) та параметрів бетону (хіміко-мінералогічний склад, вид заповнювача).

За результатами проведеного аналізу сформульовані мета і завдання досліджень.

Результати, наведені в розділі, опубліковані в таких роботах автора [80, 81, 82].

РОЗДІЛ 2

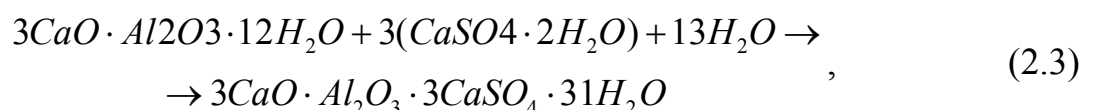
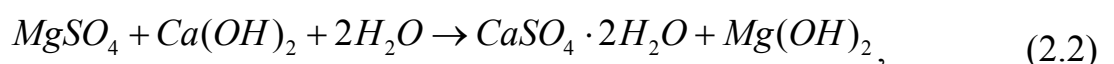
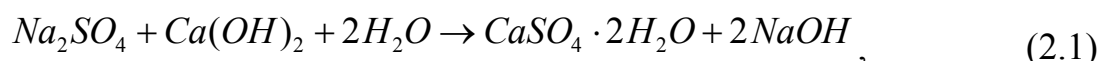
ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ В УМОВАХ СУЛЬФАТНОЇ КОРОЗІЇ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА

2.1 Математична модель сульфатної корозії бетону з урахуванням температури експлуатаційного середовища

Сульфатна корозія відбувається в цементному камені під впливом сульфатів (іонів SO_4^{2-}), пов'язаних з катіонами Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ . Еtringіт та гіпс є основними продуктами хімічної реакції між середовищем, що містить сульфатний розчин та продуктами гідратації цементу. Руйнування бетону у сульфатних розчинах відбувається через утворення еtringіту. Механізм хімічних реакцій полягає у наступному. Агресивний вплив сульфату натрію на бетон зумовлений двома основними реакціями: реакцією сульфату натрію (Na_2SO_4) або сульфату магнію ($MgSO_4$) та гідроксиду кальцію ($Ca(OH)_2$) з утворенням гіпсу (рівняння 2.1 та 2.2) та реакція утвореного гіпсу з гідратами алюмінату кальцію, що призводить утворенням еtringіту (рівняння 2.3).

Форма еtringіту, що утворюється в цементній пасті, залежить від фази гідратів алюмінату кальцію, яка реагує з сульфатом. У свіжому бетоні гіпс, вступає в реакцію з гідратами алюмінату кальцію, утворюючи еtringіт, який з часом перетворюється на моносульфат.

Хімічні реакції, пов'язані із сульфатною корозією, мають вигляд:



Руйнування бетону внаслідок сульфатної корозії є складним процесом, який залежить від багатьох параметрів, що стосуються складу вихідних матеріалів та середовища впливу, а саме:

1. Параметри, що стосуються властивостей матеріалу: тип та хімічний склад цементу, його вміст у суміші, типи мінеральних домішок та їх вміст у суміші, співвідношення вода / в'язуче, ступінь гідратації, умови тверднення тощо.

2. Параметри, що стосуються властивостей бетону: структура пор, проникність, коефіцієнт дифузії, механічні властивості тощо.

3. Параметри, що стосуються умов впливу: типи сульфатних іонів, концентрація сульфатів, час впливу, температура впливу тощо.

Для розробки математичної моделі сульфатної корозії бетону з урахуванням температури експлуатаційного середовища використовуємо систему рівнянь, запропоновану в роботі [71]. У випадку одномірного процесу дифузійного механізму масопереносу в бетоні як у пористому тілі, кінетику сульфатної корозії при змінній температурі експлуатаційного середовища можна описати наступною системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_0(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_0(T) \frac{\partial c_0(x,t)}{\partial x} \right) - kc_0(x,t)c_1(x,t) \\ \frac{\partial c_1(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1(T) \frac{\partial c_1(x,t)}{\partial x} \right) - \chi kc_0(x,t)c_1(x,t) \\ \frac{\partial c_2(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_2(T) \frac{\partial c_2(x,t)}{\partial x} \right) + kc_0(x,t)c_1(x,t) - k_1c_2(x,t)c_3(x,t), \quad (2.4) \\ \frac{\partial c_3(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_3(T) \frac{\partial c_3(x,t)}{\partial x} \right) - \phi k_1c_2(x,t)c_3(x,t) \\ \frac{\partial c_4(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_4(T) \frac{\partial c_4(x,t)}{\partial x} \right) + k_1c_2(x,t)c_3(x,t) \end{array} \right.$$

де $c_0(x,t)$, $c_1(x,t)$, $c_2(x,t)$, $c_3(x,t)$, $c_4(x,t)$ – концентрації сульфат-іонів, іонів кальцію, гіпсу, гідроалюмінати кальцію, еттрінгіта відповідно;

$D_0(T), D_1(T), D_2(T), D_3(T), D_4(T)$ – відповідно, ефективні коефіцієнти дифузії сульфат-іонів, іонів кальцію, гіпсу, гідроалюмінатів кальцію, еtringіта, що залежать від температури експлуатаційного середовища;

χ, φ – стехіометричні коефіцієнти, які відображають відносну кількість речовин, що беруть участь в реакції;

k, k_1 – константи швидкості хімічних реакцій;

t – час;

x – координата по глибині бетону від поверхні.

У системі рівнянь (2.4) ефективні коефіцієнти дифузії іонів $D_i(T)$ залежать від структури пор бетону та температури експлуатаційного середовища.

У випадку сульфатної корозії початкові умови визначаються в момент часу $t=0$. При цьому вважаємо, що концентрації

$$c_0(x, 0) = c_2(x, 0) = c_4(x, 0) = 0, \quad (2.5)$$

$$c_1(x, 0) = c_{1,0}, \quad (2.6)$$

$$c_3(x, 0) = c_{3,0}, \quad (2.7)$$

де $c_{1,0}, c_{3,0}$ - концентрація (вміст) гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та гідроалюмінату, обумовленого гідратацією трикальцієвого алюмінату С3А та чотирикальцієвого алюмофериту С4АФ.

Граничні умови визначаються для поверхні бетону при координаті $x=0$:

$$c(0, t) = c_{\text{Na}_2\text{SO}_4}, \quad (2.8)$$

де $c_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ - концентрація сульфат-іонів Na_2SO_4 в експлуатаційному середовищі.

Друга гранична умова при $x=a$ записується наступним чином::

$$\frac{\partial c_i(x,t)}{\partial x} = 0, \quad (2.9)$$

де i – номер речовини, що вступає в реакцію;

Вважається, що з поверхні бетону не видаляються речовини, тобто

$$\frac{\partial c_i(x,t)}{\partial x} = 0, \quad (2.10)$$

2.2 Ефективний коефіцієнт дифузії сульфат-іонів в бетоні з урахуванням температури експлуатаційного середовища

Інтенсивність дифузії сульфатів у поровій воді бетону є основною змінною у моделі для прогнозування терміну служби бетону, що зазнає агресивного впливу сульфатних розчинів. З огляду на це, точність прогнозування значною мірою залежить від точності визначення коефіцієнта дифузії, як швидкості, з якою система здатна вирівнювати різницю концентрацій.

Коефіцієнт дифузії залежить від величини і форми іонів речовини, яка дифундує. Він збільшується із зменшенням розміру дифундуючих часток і зменшується із збільшенням в'язкості.

Ефективний коефіцієнт дифузії іонів в твердому тілі відображає вплив параметрів структури бетону (кількість, форма, розміри, звивистість пір) і властивостей поверхні твердої фази на просування дифузійних іонів. Інтенсивність дифузії сульфат-іонів зменшується за рахунок утворення еtringіту в поровій системі бетону та, навпаки, зростає зі утворенням та збільшенням мікротріщин, внаслідок внутрішніх напружень, які викликані розширенням новоутворень і досягають міцності бетону на розтяг.

Істотний вплив на процес дифузії обумовлює температура середовища. З підвищенням температури збільшується коефіцієнт дифузії i , відповідно, швидкість процесу корозії.

Вищевикладені особливості зміни процесу проникнення агресивних речовин враховуються шляхом введення ефективного коефіцієнту дифузії іонів в твердому тілі, який відображає вплив параметрів структури бетону (кількість, форма, розміри, звивистість пір), властивостей поверхні твердої фази, а також температури на просування дифузійних іонів.

На основі запропонованої в роботі [71] залежності, визначати ефективний коефіцієнт дифузії іонів речовин в бетоні з урахуванням температури середовища можна наступним чином:

$$D_{b,i}(T) = a\omega_{b0}D_i(T), \quad (2.11)$$

де $D_{b,i}(T)$ - ефективний коефіцієнт дифузії іонів в бетоні з урахуванням температури середовища;

$D_i(T)$ - коефіцієнт дифузії i -іонів у водному розчині з урахуванням температури середовища;

ω_{b0} – обсяг відкритих пор;

a - коефіцієнт, що дорівнює $a = 0,026 \times 10^{-2}$.

Коефіцієнт дифузії є характеристикою, надзвичайно чутливою до температури. Залежність коефіцієнта дифузії від температури близька до закону Арреніуса, тому може бути записана у вигляді:

$$D_i(T) = D_{i,ref} \cdot f(T), \quad (2.12)$$

де $f(T)$ – функція впливу температури на коефіцієнт дифузії:

$$f(T) = \exp \left[\frac{E_D}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (2.13)$$

T – еталонна температура, яка приймається 25°C;

$D_{i,ref}$ – коефіцієнт дифузії при еталонній температурі;

E_D – енергія активації процесу дифузії, кДж/моль;

R – універсальна газова стала, що дорівнює 8,314 Дж/(моль·К).

Для визначення коефіцієнта дифузії (m^2/c) сульфат-іонів в бетоні при нормальній температурі можна використати емпіричну залежність, запропоновану в роботі [45]:

$$D_{SO_4} = 3.17 \cdot 10^{-15} (2460(W / C - 0.3)^2 + 15), \quad (2.14)$$

де W/C – водоцементне співвідношення.

Рівняння (2.14) справедливе для бетонів з водоцементним співвідношенням $W/C \geq 0.3$. Наприклад, при водоцементному співвідношенні $W/C = 0.4$ теоретичне значення коефіцієнту дифузії становитиме $D_{SO_4} = 1.25 \cdot 10^{-13} m^2 / c$.

Слід відзначити, що запропоновані залежності також справедливі для температур більше 0°C.

Дані щодо величини коефіцієнта дифузії при нормальній температурі в залежності від водоцементного співвідношення приведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Величина коефіцієнта дифузії при нормальній температурі в залежності від водоцементного співвідношення

Водоцементне співвідношення	W/C	0,35	0,4	0,45	0,5
Коефіцієнт дифузії	D_{SO_4} , м ² /с	$0,67 \cdot 10^{-13}$	$1,25 \cdot 10^{-13}$	$2,23 \cdot 10^{-13}$	$3,59 \cdot 10^{-13}$

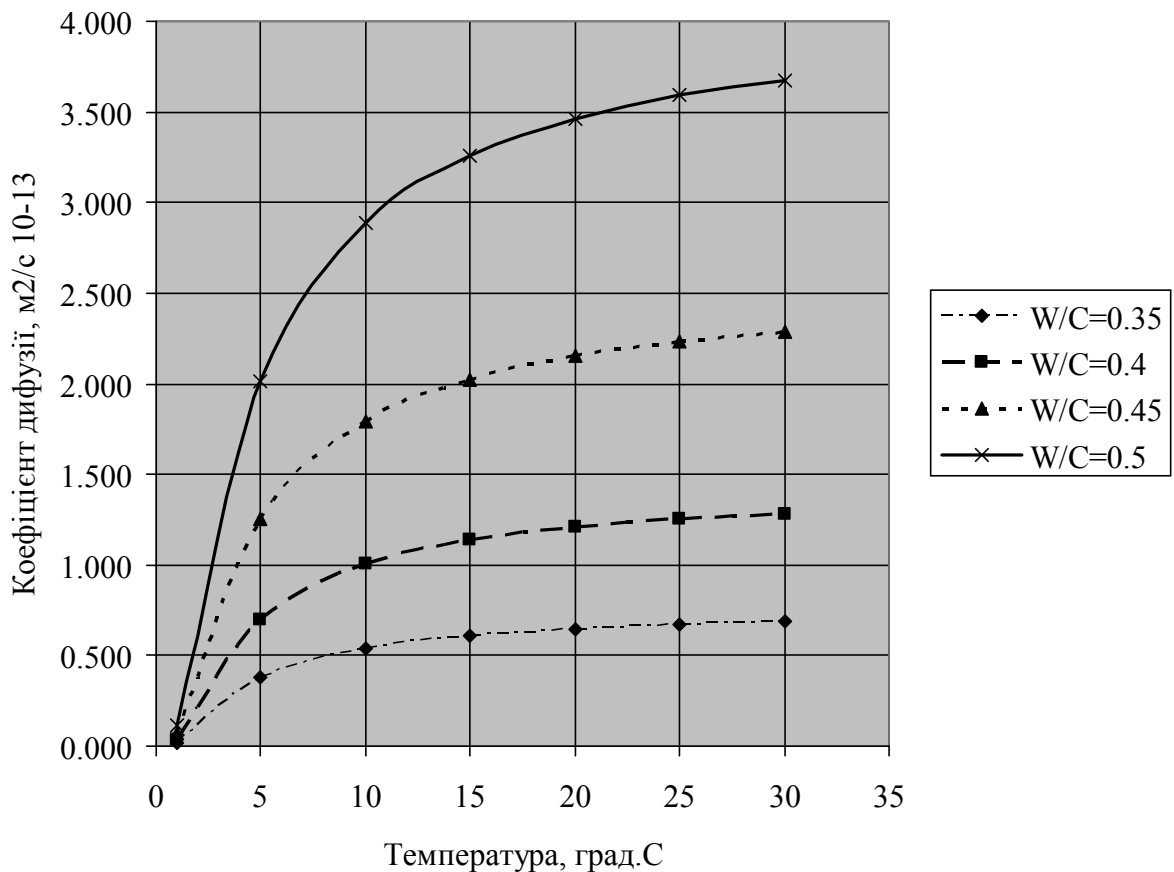


Рисунок 2.1 – Графік залежності коефіцієнта дифузії сульфат-іонів в бетоні від температури середовища

Як видно з отриманих графіків, коефіцієнт дифузії сульфат-іонів сильно залежить від температури. При температурі близької до нуля, дифузія фактично відсутня. В інтервалах температури від 1 до 15 °C коефіцієнт дифузії інтенсивно збільшується. При значеннях 20-30 °C вплив температури на процес дифузії стає менш істотним.

Таблиця 2.2 - Величина коефіцієнта дифузії в залежності від температури

Температура, Т, °С	Коефіцієнт дифузії, D_{SO_4} , м ² /с, при водоцементному співвідношенні			
	W/C=0.35	W/C=0.4	W/C=0.45	W/C=0.5
1	0,021	0,039	0,070	0,112
5	0,376	0,702	1,252	2,015
10	0,540	1,007	1,796	2,891
15	0,609	1,135	2,025	3,261
20	0,646	1,206	2,151	3,463
25	0,670	1,250	2,230	3,590
30	0,686	1,280	2,284	3,677

Обсяг відкритих пор від загального об'єму пор бетону визначається за залежністю [3]:

$$\omega_b = \beta_1 \frac{W/C - W_{chm} \alpha_g}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_w} W/C + \frac{1}{\rho_g} G + \frac{1}{\rho_s} S}, \quad (2.15)$$

де β_1 - відносний обсяг відкритих пір ($\beta_1 \approx 0,9$);

W/C - водо-цементне співвідношення;

W_{chm} - відносна маса хімічно зв'язаної води (по відношенню до цементу);

α_g - ступінь гідратації;

$\rho_c, \rho_w, \rho_g, \rho_s$ - густина цементу, води, щебеню, піску, відповідно;

G, S - відносний зміст щебеню та піску в бетоні.

Відносну масу хімічно зв'язаної води можна визначити з використанням залежності [71]:

$$W_{chm} = 0,199n(C3S) + 0,152n(C2S) + 0,561n(C3A) + 0,178(C4AF), \quad (2.16)$$

де n – відносний зміст відповідних мінералів у клінкері цементу.

Ступінь гідратації цементу α_g залежить від водо-цементного співвідношення и визначається як [71]:

при $W / C \leq 0,35$

$$\alpha_g = 1,571W / C + 0,12; \quad (2.17)$$

при $W / C > 0,35$

$$\alpha_g = 0,67. \quad (2.18)$$

Структура бетону, від якої залежить його проникність, є функцією не тільки внутрішніх параметрів бетону, але і зовнішніх факторів. Найважливішим фактором є кількість продуктів новоутворень, що змінює початкові параметри структури бетону.

Зміна відкритої пористості в залежності від кількості зв'язаних сульфат-іонів та кількості новоутворень може описуватися рівняннями [71]:

при $0 < C_{св}(t) \leq C_{св,1}$

$$\omega_{b0}(t) = \omega_{b0,(t=0)} - \frac{C_{св}(t)}{C_{св,u}} \omega_{b0n,u}, \quad (2.19)$$

при $C_{св,1} < C_{св}(t) \leq C_{св,u}$

$$\omega_{b0}(t) = \omega_{b0,(t=0)} - \frac{C_{св}(t)}{C_{св,u}} \omega_{b0n,u} + \left[1 + \frac{C_{св}(t)}{C_{св,u}} \omega_{b0n,u} - \omega_{b0,(t=0)} \right] \frac{C_{св}(t) - C_{св,1}}{C_{св,u} - C_{св,1}}, \quad (2.20)$$

где $C_{св}(t)$ - количество связанных сульфат - ионов в момент времени t ;

$C_{св,1}$, $C_{св,u}$ - соответственно, количество связанных сульфат - ионов, вызывающее максимальное упрочнение бетона и его полное разрушение;

$\omega_{b0n,u}$ - величина открытой пористости, занятая продуктами новообразований в момент разрушения бетона;

$\omega_{b0,(t=0)}$ - величина відкритої пористості в початковий момент часу.

Кількість зв'язаних сульфат - іонів, що викликає максимальне зміцнення бетону визначається за формулою:

$$C_{ce,1} = k_{C_3A} k_{SO_4} \omega_{b0,(t=0)}, \quad (2.21)$$

де $C_{ce,1}$ - кількість зв'язаних сульфат-іонів, що викликає максимальне зміцнення бетону;

k_{C_3A} - коефіцієнт, що враховує вміст трьохкальцієвого алюмінату в цементі;

k_{SO_4} - коефіцієнт, що залежить від концентрації сульфат-іонів в розчині;

$$k_{C_3A} = \begin{cases} 1.09 & \text{при } C_3A \leq 5\% \\ 1.1 & \text{при } C_3A > 5\% \end{cases}; \quad (2.22)$$

$$k_{SO_4} = \begin{cases} \rho_{ettr} & \text{при } 0 < C_{SO_4} \leq 1.055 \\ 0.2\rho_{ettr} + 0.8\rho_{gyss} & \text{при } 1.055 < C_{SO_4} \leq 4, \\ \rho_{gyss} & \text{при } C_{SO_4} > 4 \end{cases} \quad (2.23)$$

ρ_{ettr} – густина етрінгіту ($\rho_{ettr} = 1.48 \text{ г/см}^3$);

ρ_g – плотность гипса ($\rho_g = 2,4 \text{ г/см}^3$).

Величина відкритої пористості, що займають продукти новоутворень в момент руйнування бетону, визначається за формулою:

$$\omega_{b0n,u} = k_{pr} \omega_{b0,(t=0)}, \quad (2.24)$$

де $\omega_{b0n,u}$ - обсяг, що займають продукти новоутворень в момент руйнування бетону;

$\omega_{b0,(t=0)}$ - величина відкритої пористості в початковий момент часу;

k_{pr} - коефіцієнт обсягу продуктів новоутворень від початкового обсягу відкритих пор, який залежить від вмісту трьохкальцієвого алюмінату в цементі:

$$k_{pr} = \begin{cases} 1,59 & \text{при } C_3A \leq 5\% \\ 1,47 & \text{при } 5 < C_3A \leq 12\% , \\ 1,35 & \text{при } C_3A > 12\% \end{cases} \quad (2.25)$$

Таким чином, з урахуванням вищенаведених залежностей, формула для ефективного коефіцієнта дифузії бетону з урахуванням накопичення продуктів реакції агресивного сульфатного середовища зі складовими бетону, розрихлення структури внаслідок внутрішніх напружень, а також температури середовища експлуатації може бути записана таким чином:

при $0 < C_{св}(t) \leq C_{св,1}$

$$D_{b,i}(t, T) = a \omega_{b0}(t) D_i(T), \quad (2.26)$$

при $C_{св,1} < C_{св}(t) \leq C_{св,u}$

$$D_{b,i}(t, T) = a \left(\frac{D_{b,i}(t_1, T)}{D_i(T)} + \frac{1 - D_{b,i}(t_1, T)}{D_i(T)} \cdot \frac{\omega_{b0}(t) - \omega_{b0}(t_1)}{\omega_{b0}(t_u) - \omega_{b0}(t_1)} \right) D_i(T). \quad (2.27)$$

Отримані залежності, дозволяють врахувати зміни коефіцієнта дифузії сульфат-іонів в залежності від температури середовища, а також вплив процесу деградації внаслідок утворення етрінгіту на зміну пористості бетону.

2.3 Прогнозування міцності бетону в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури експлуатаційного середовища

Відповідно до фізико-хімічних процесів, які розвиваються в бетоні при дії рідких сульфатних середовищ можливо виділити декілька стадій стану умовно виділеного елемента площі (елементарного шару) бетону, пов'язаних з впливом водонасичення і накопичення новоутворень в структурі:

а) стадія, викликана проявом головним чином, адсорбційного ефекту зниження міцності;

б) стадії розвитку корозійних процесів, для яких характерно: зміцнення бетону, знеміцнювання бетону, втрата суцільності і руйнування бетону. В останній стадії елементарний шар має міцність близьку до нуля або повністю зруйнований.

Швидкість знеміцнення бетону в умовах агресивного середовища прямо пропорційна кількості сульфатів, що знаходяться в зовнішньому агресивному середовищі. Чим більша кількість сульфат-іонів міститься в середовищі, тим швидше бетон конструкції їх поглинає і тим швидше відбувається знеміцнення (рис. 2.2).

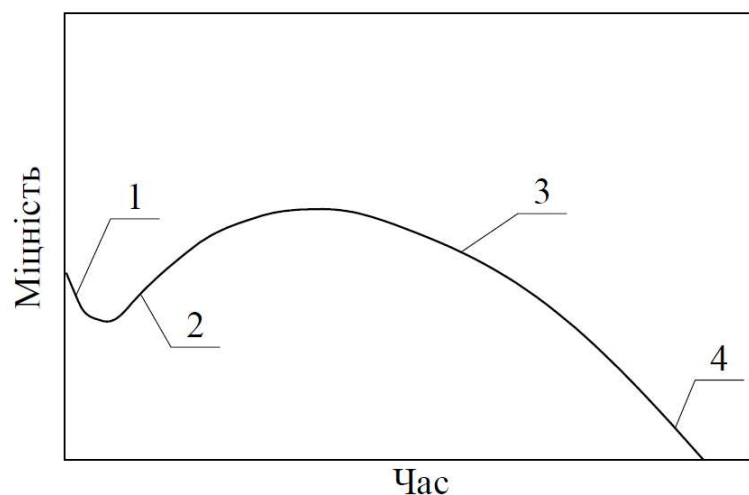


Рис. 2.2. Схема зміни міцності бетону при постійній дії сульфатних розчинів:

1 - стадія зниження міцності бетону в результаті адсорбційного ефекту;

стадії розвитку корозійного процесу : 2- $Q_{SO_3}(z,\tau) \leq Q_{SO_3,1}$,

3 - $Q_{SO_3,1} < Q_{SO_3}(z,\tau) < Q_{SO_3,U}$, 4- $Q_{SO_3}(z,\tau) \geq Q_{SO_3,U}$

Для визначення необхідного антикорозійного захисту необхідно прогнозувати міцність бетону до кінця терміну експлуатації. Залежність для оцінки зміни міцності бетону при взаємодії з агресивними сульфатними розчинами в роботі пропонується описувати виразом [83]

$$f_{cd}(x, t) = \gamma_{ca}(t) \gamma_{cg}(t) \gamma_{cs}(x, t) f_{cd}, \quad (2.28)$$

де $f_{cd}(x, t)$ – міцність бетону в обсягу з координатою x в момент часу t при агресивному впливі сульфат-іонів;

$\gamma_{ca}(t)$, $\gamma_{cg}(t)$, $\gamma_{cs}(x, t)$ – коефіцієнти умов роботи, що враховують, відповідно, ефект адсорбційного зниження міцності бетону при водонасиченні, процес гідратації цементного каменю, результат взаємодії активних компонентів середовища і цементного каменю.

В роботі [3] встановлено, що коефіцієнти $\gamma_{ca}(t)$ та $\gamma_{cg}(t)$ не мають значного впливу на характер зміни та значення міцності по закінченню досліджуваного періоду. З огляду на це при оцінці міцності бетону в умовах сульфатної корозії враховується тільки коефіцієнт $\gamma_{cs}(x, t)$, формула для визначення якого має вигляд:

$$\gamma_{cs}(x, t) = 1 + a_1 Q_{SO_3}(x, t) (1 - a_2 Q_{SO_3}(x, t)), \quad (2.29)$$

де $Q_{SO_3}(x, t)$ – кількість зв'язаних цементним каменем сульфат-іонів на глибині з координатою x в момент часу t ;

a_1 , a_2 – коефіцієнти, які становлять $a_1 = 4 \cdot 10^{-3}$; $a_2 = 6,0$.

Кількість зв'язаних цементним каменем сульфат-іонів при одномірній дифузії та стаціонарному режимі впливу середовища на основі розв'язку системи диференціальних рівнянь (2.4) може бути визначене в такий спосіб:

$$Q_{SO_3}(x, t) = c_{C_3AH_6}(x, t) + c_{etr}(x, t), \quad (2.30)$$

де $c_{C3AH6}(x,t)$, $c_{ettr}(x,t)$ – відповідно, концентрації гідроалюмінату кальцію та етрінгіту, що утворилися в результаті взаємодії сульфат-іонів з бетоном, в момент часу t на глибині з координатою x .

При цьому в системі рівнянь (2.4) концентрація гідроалюмінату кальцію $c_{C3AH6}(x,t) = c_3(x,t)$, в свою чергу етрінгіту $c_{ettr}(x,t) = c_4(x,t)$.

Для прогнозування зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища було розроблено алгоритм, який полягає у наступному:

- 1) здаються параметри середовища експлуатації (концентрація сульфат-іонів та температура);
- 2) задаються характеристики компонентів бетону (витрата цементу, водо-цементне співвідношення, відносний вміст цементу, піску та щебеню, параметри температурного стану середовища);
- 3) визначається теоретична ступінь гідратації цементу за формулою (2.18) та відносна маса хімічно зв'язаної води за формулою (2.17);
- 4) визначається кількість відкритих пор в початковий момент часу за формулою (2.16);
- 5) визначається ефективний коефіцієнт дифузії сульфат-іонів за формулою (2.26), (2.27);
- 6) задається товщина шару бетону, для якої необхідно визначити кількість зв'язаних сульфат-іонів, та період часу, тобто розрахунковий термін експлуатації;
- 7) виконується розв'язок системи диференціальних рівнянь (2.4), які описують процес сульфатної корозії;
- 8) за формулою (2.30) визначається кількість зв'язаних сульфат-іонів в момент часу t на глибині з координатою x ;
- 9) за формулою (2.28) визначається фактична міцність бетону з урахуванням впливу сульфатної корозії та температури середовища експлуатації.

Таким чином, знаючи параметри середовища експлуатації (концентрацію сульфат-іонів як агресивної речовини та температуру як каталізатор корозійного процесу), можна виконувати підбір параметрів первинного захисту, а саме: склад бетону, водо-цементне співвідношення, товщину захисного шару тощо.

2.4 Теоретичні дослідження кінетики процесу та зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища

З метою встановлення впливу температури середовища при сульфатній корозії в умовах було проведено чисельний експеримент. Суть експерименту полягала у визначенні концентрацій взаємодіючих речовин (сульфат-іонів, іонів кальцію, гідроалюмінату кальцію та зв'язаних сульфат-іонів) по глибині бетону від його зовнішньої поверхні. Реалізація експерименту виконувалась із використанням програмного комплексу MathCAD 15.

Для експерименту прийнято бетон з характеристиками, приведеними в табл. 2.3, на портландцементі Воскресенського заводу з мінералогічним складом, приведеним в табл. 2.4.

Таблиця 2.3 – Характеристики бетону

Водоцементне співвідношення	Відносний вміст		
	цементу	піску	щебеню
0,5	1	2,5	4

В якості агресивного середовища прийнято вплив розчину сульфату натрію Na_2SO_4 з концентрацією 50 г/л при температурі 5 та 30 °С. Розподіл концентрацій речовин визначався на глибини бетону $x=0..5$ см, при цьому координата $x=0$ відповідає зовнішній поверхні.

Таблиця 2.4 –Мінералогічний склад портландцементу

Трикальцієвий силікат (аліт) C3S	Двокальцієвий силікат (біліт) C2S	Трикальцієвий алюмінат C3A	Чотирикальцієвий алюмоферит C4AF
60%	17%	7%	17%

Графіки зміни ефективних коефіцієнтів дифузії взаємодіючих речовин від температури, визначені з використанням залежностей (2.26), (2.27) приведені на рис. 2.3.

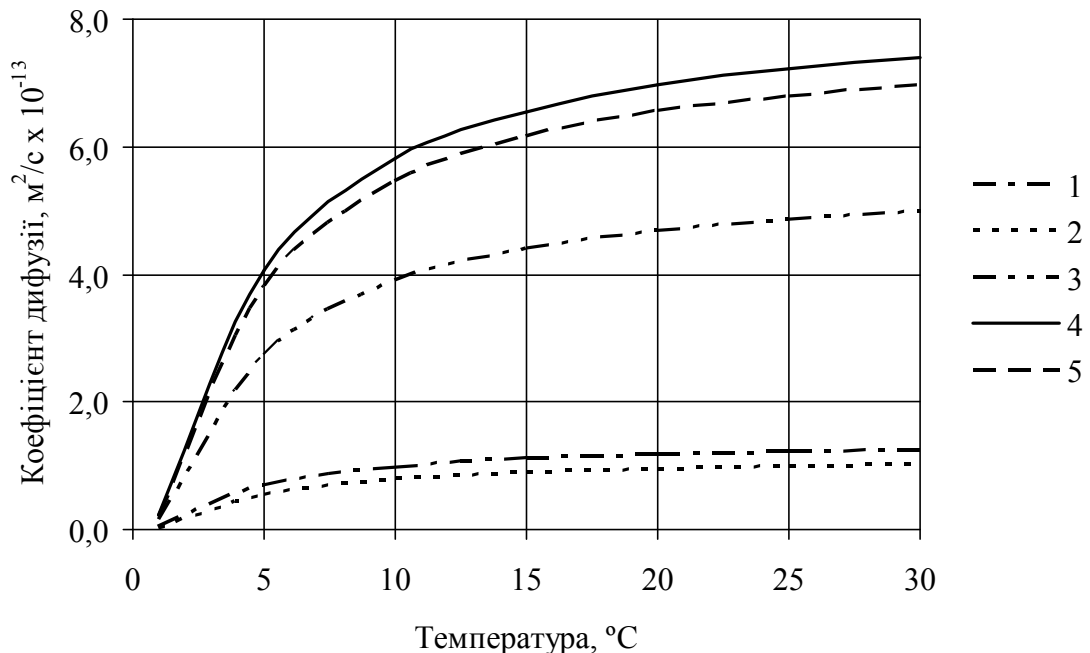


Рисунок 2.3 – Залежності зміни ефективних коефіцієнтів дифузії взаємодіючих речовин від температури:

- 1 – сульфат-іони; 2 - іони кальцію;
3 - гідроалюмінат кальцію; 4 – етрінгіт; 5 – сульфат кальцію

На рис. 2.4 - 2.9 приведено розподіл концентрацій сульфат-іонів, іонів кальцію, гідроалюмінату кальція та зв'язаних сульфат-іонів по глибині бетону через 5 років при температурах 5 та 30 °C.

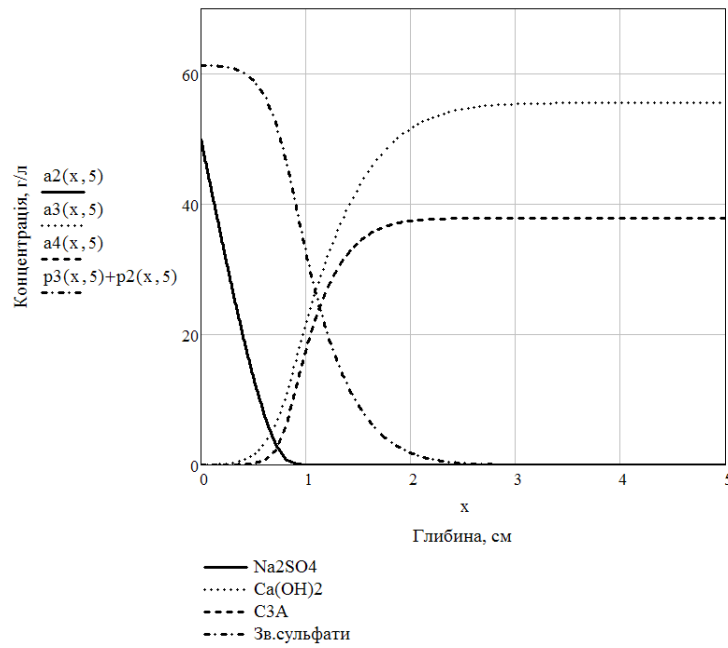


Рисунок 2.4 – Розподіл концентрацій сульфат-іонів, іонів кальцію, гідроалюмінату кальцію та зв'язаних сульфат-іонів по глибині бетону через 5 років при температурі 5 °С

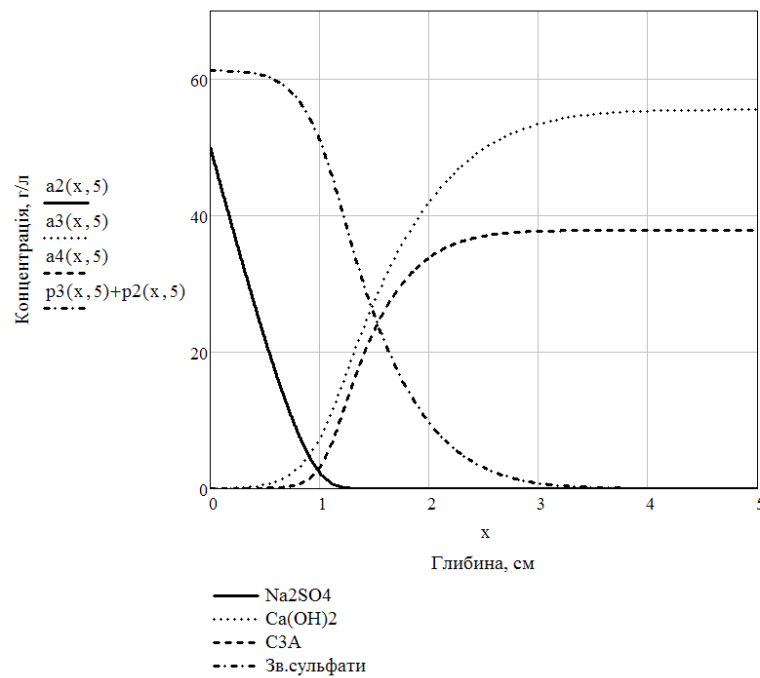


Рисунок 2.5 – Розподіл концентрацій сульфат-іонів, іонів кальцію, гідроалюмінату кальцію та зв'язаних сульфат-іонів по глибині бетону через 5 років при температурі 30 °С

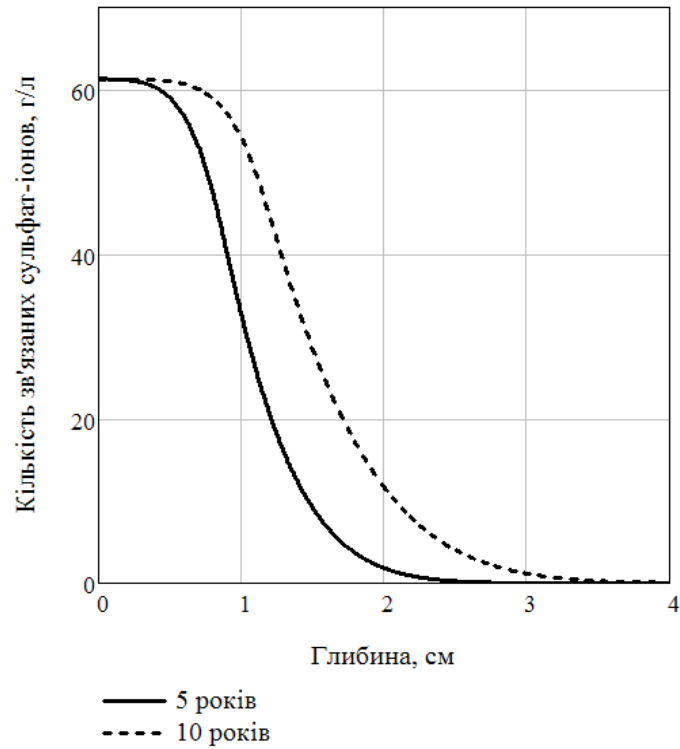


Рисунок 2.6 – Графік зміни кількості зв'язаних сульфат-іонів в розчині сульфату натрію з концентрацією 50 г/л при температурі 5 °C

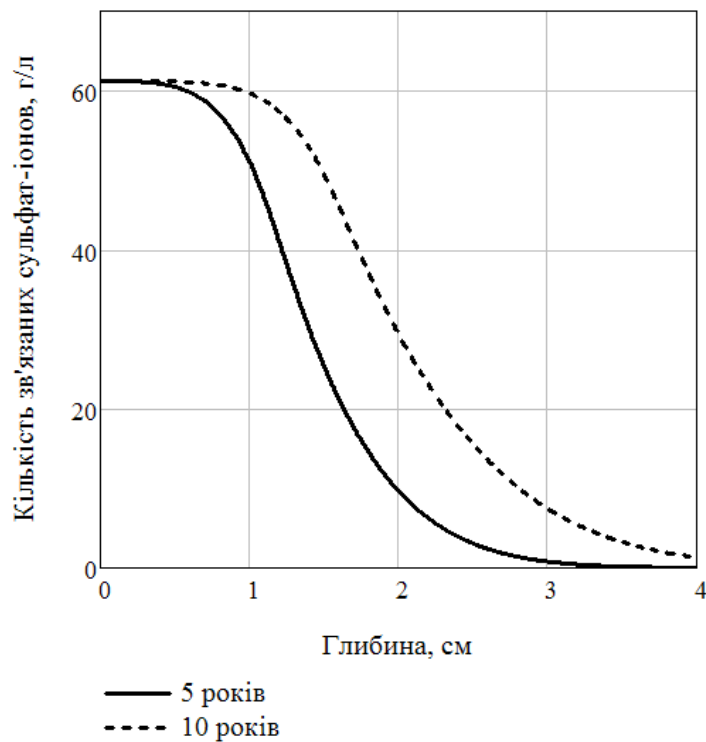


Рисунок 2.7 – Графік зміни кількості зв'язаних сульфат-іонів в розчині сульфату натрію з концентрацією 50 г/л при температурі 30 °C

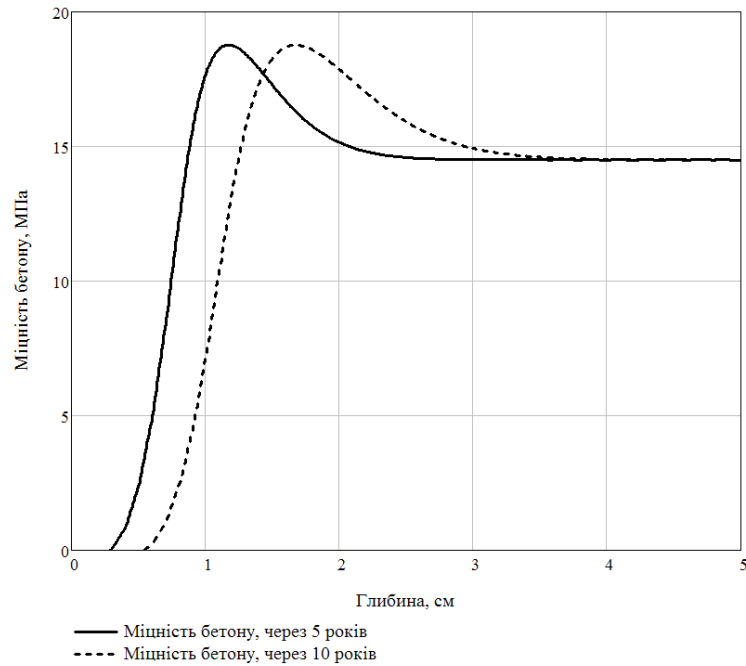


Рисунок 2.8 – Графік зміни міцності бетону в розчині сульфату натрію с концентрацією 50 г/л при температурі 5 °С

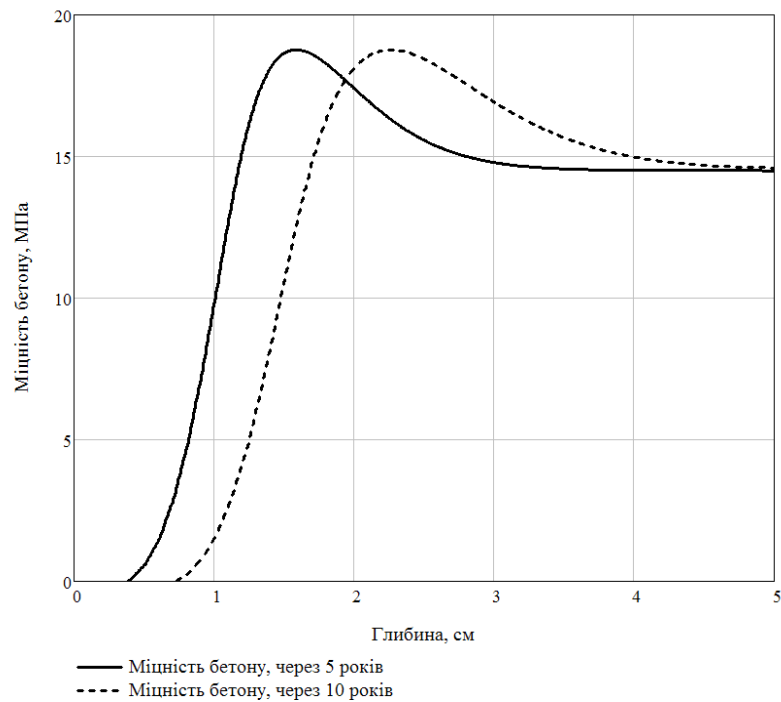


Рисунок 2.9 – Графік зміни міцності бетону в розчині сульфату натрію с концентрацією 50 г/л при температурі 30 °С

Отримана модель дозволяє врахувати всі основні особливості процесів корозії бетону при впливі сульфатів і з задовільною точністю описати закономірність розподілу пов'язаних сульфат-іонів і відносної міцності бетону.

2.5 Вплив міцності бетону і товщини захисного шару на довговічність залізобетону

Руйнування залізобетону внаслідок корозії арматури зазвичай відбувається в результаті утворення на сталі різних сполук заліза, які чинять тиск на бетон в зоні контакту його з арматурою. У зв'язку з малим питомим об'ємом заліза руйнування захисного шару спостерігається в конструкціях, що експлуатуються не тільки у вологих умовах, але і в різних промислових агресивних середовищах. З даних обстежень і науково-дослідних робіт [84] відомо, що період накопичення в бетоні продуктів корозії може вимірюватися багатьма роками.

Розглянемо умови руйнування захисного шару продуктами корозії арматури. На рис. 2.10 представлено поперечний переріз бетонного елемента з арматурним стержнем, що кородує в ньому. Будемо вважати тиск продуктів корозії рівномірно розподіленим по поверхні контакту бетону та арматури. Розподіл напружень в плоскому полі, обмеженому прямою, з розташованим на деякій відстані від прямолінійного краю круговим отвором радіусом R , по контуру якого прикладено рівномірно розподілений тиск P , може бути визначено на основі передумов теорії пружності [85].

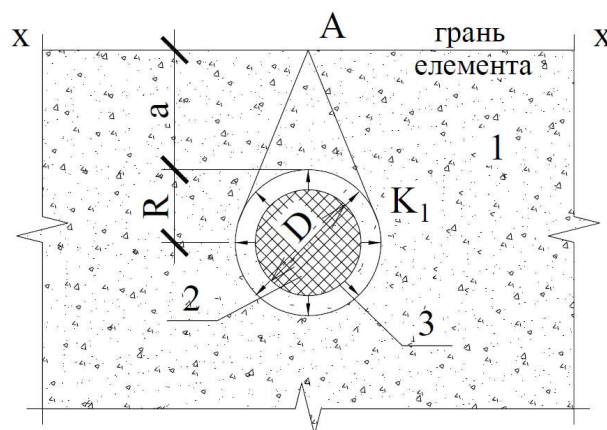


Рисунок 2.10 – Розрахункова схема перерізу залізобетонного елемента з одиночним сталевим стержнем, що кородує: 1 – бетонний елемент; 2 – сталевий арматурний стержень; 3 – продукти корозії

Якщо x позначено відстань, що відкладена від точки A вздовж осі A_x , то напруження σ_x по контуру прямолінійної грані на півплощини (осі A_x) буде дорівнювати:

$$\sigma_x = -4P \frac{x^2 - 2aR - a^2}{x^2 + 2aR + a^2}, \quad (2.31)$$

де a – найкоротша відстань до контуру отвору від межі на півплощини;

P – тиск продуктів корозії арматури.

Продиференціював вираз (1) за x та прирівнявши до нуля похідну $\frac{d\sigma_x}{dx}$,

отримаємо, що функція $\sigma_x = f(x)$ має дві екстремальні точки:

1 – при $x=0$, яка, як видно з безпосереднього розгляду виразу (1), відповідає найбільшим напруженням розтягу, що виникають в точці A ;

2 – при значенні $x = \pm\sqrt{3(a^2 + 2aR)}$, відповідає максимальним напруженням стиску:

$$(\sigma_x)_{\max}^+ = 4P \frac{R^2}{a^2 + 2aR}, \quad (2.32)$$

$$(\sigma_x)_{\max}^- = -\frac{1}{2}P \frac{R^2}{a^2 + 2aR}, \quad (2.33)$$

При збільшенні значення x напруження стиску після максимального значення затухають вельми швидко, в зв'язку з тим, що знаменник виразу (2.31) представлений поліномом четвертого ступеня відносно x , а чисельник – поліномом другого ступеня.

В точках $x = \pm\sqrt{a^2 + 2aR}$ напруження σ_x дорівнюють нулю.

При менших значеннях x напруження σ_x стають розтягуючими, при більших – стискаючими.

Перенесемо P в ліві частини рівнянь (2.32), (2.33), а чисельник і знаменник розділемо на R^2 .

Графік функції $\frac{\sigma_x}{P} = f(x)$ при $x > 0$ і при різних значеннях $\frac{a}{R}$ представлено на рис. 2.11.

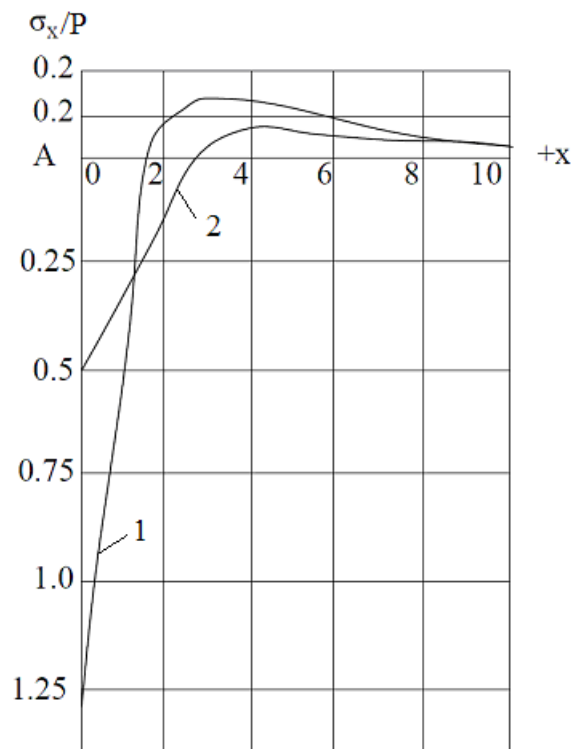


Рисунок 2.11 – Напруження на грані залізобетонного елемента поблизу арматурного стержня, що кородує, при різних значеннях параметра $\frac{a}{R}$:

1 – конструкція з параметром $\frac{a}{R} = 2$; 2 – те саме з параметром $\frac{a}{R} = 1$

Можна показати, що аналіз, що проведено для одного стержня, характеризується достатнім узагальненням і зроблені при цьому висновки можна розповсюдити на інші системи армування бетону.

Напруження розтягу виникають також і на контурі кругового отвору. Максимальної величини вони досягають в точках контуру K , де пряма, що

проведена з точки А, буде дотичною до контуру отвору. Величина цих напружень σ_R буде дорівнювати:

$$(\sigma_R)_{\max} = P \frac{a^2 + 2aR + 2R^2}{a^2 + 2aR}. \quad (2.34)$$

Прирівнявши вирази (2) та (3), отримаємо, що при значенні

$$a = (\sqrt{3} - 1)R = 0.73R. \quad (2.35)$$

Найбільші напруження на контурі кругового отвору дорівнюють максимальним напруженням розтягу на межі напівплощини.

Якщо відстань $a < 0.73R$, то найбільші напруження виникатимуть в точці А прямолінійної межі напівплощини; якщо $a > 0.73R$, то тріщина виникне на контурі отвору.

Перенесемо Р в ліві частини виразів (2.32) та (2.34), а чисельник і знаменник правих частин розділемо на R^2 .

Графік функцій $\frac{\sigma_x}{P} = \psi\left(\frac{a}{R}\right)$ та $\frac{\sigma_R}{P} = f\left(\frac{a}{R}\right)$ приведено на рис. 2.12.

З рис. 2.12 видно, що при $\frac{a}{R} > 0.73$, тріщина, очевидно, з'явиться на контурі отвору, в той час як при $\frac{a}{R} < 0.73$ найбільш вірогідна поява тріщини на межі напівплощини.

Вирази (2.32) і (2.34) дозволяють встановити зв'язок між геометричними параметрами конструкції, механічними властивостями бетону і ступенем корозії арматури, що викликає руйнування захисного шару.

Область кривих, зображених на рис. 2.12, може бути умовно розбита на три ділянки.

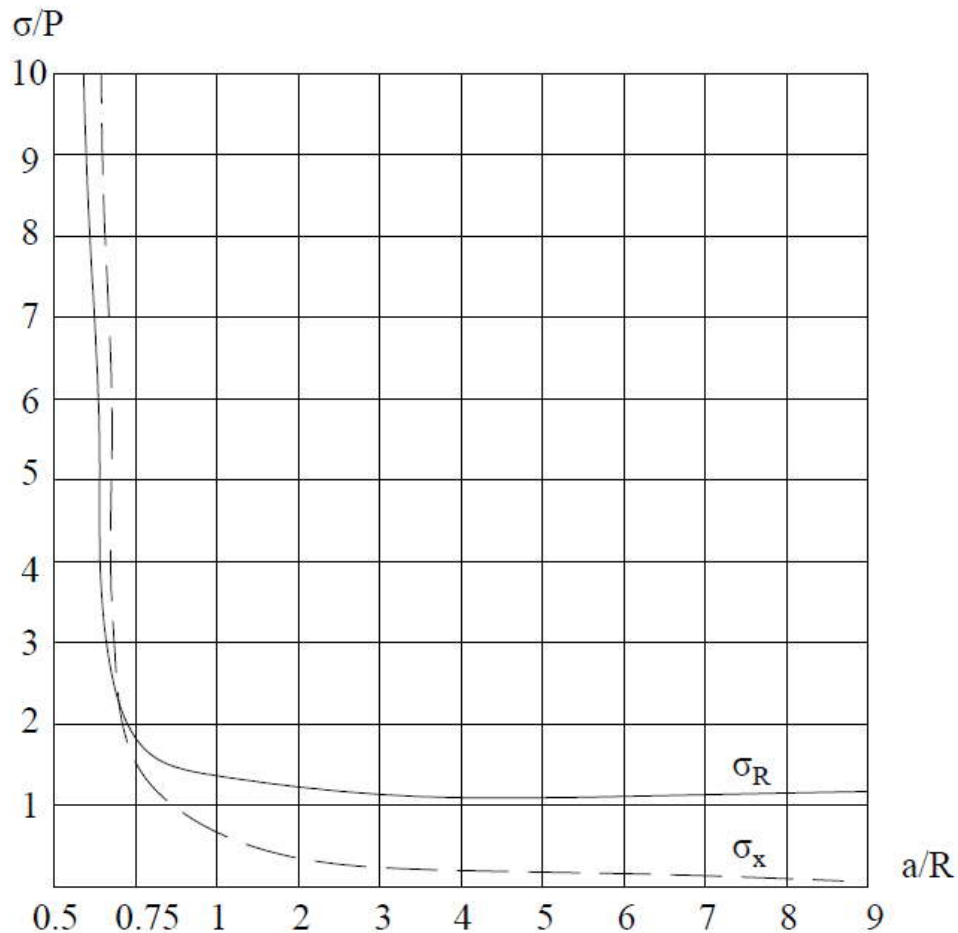


Рисунок 2.12 – Графік максимальних розтягуючих напружень в бетоні поблизу арматурного стержня, що кородує: σ_R - в точці K_1 на контурі кругового отвору по контакту бетону та арматури; σ_x - в точці А на межі напівплощини (на грані залізобетонного елемента (див. рис. 2.10))

При значенні безрозмірного параметра $\frac{a}{R} < 1$ спостерігається дуже різка залежність розтягуючих напружень в бетоні, викликаних тиском P продуктів корозії арматури, від конструктивних особливостей залізобетонної конструкції. Звідси випливає, що в області малих захисних шарів, точніше малих величин $\frac{a}{R}$, порівняно невелике зменшення товщини захисного шару внаслідок будь-яких порушень технологічних правил виготовлення конструкцій може привести до різкого зменшення опору цього шару тиску продуктів корозії.

Друга ділянка, якій відповідають значення $\frac{a}{R}$ від 1 до 2-2,5, є перехідною областю - тут залежність розтягуючих напружень в бетоні від геометричних параметрів конструкції носить яскраво виражений характер.

Третя ділянка з відношенням товщини захисного шару до радіусу арматури більше 2-2,5, для якого вплив геометричних співвідношень незначно, подальше збільшення захисного шару тут практично не призводить до підвищення його опору тиску продуктів корозії арматури.

На третій ділянці напруження в бетоні захисного шару практично дорівнюють тиску продуктів корозії. Отже, цей тиск не може перевищити міцність бетону при розтягуванні, і в зв'язку з цим сумнівні твердження деяких авторів про те, що тиск, що розвивається під час утворення іржі в бетоні досягає 150-160 кг/см² [86].

В табл. 2.5 приведені результати розрахунків максимального тиску продуктів корозії сталі P в кг/см², що відповідає руйнуванню захисного шару бетону в залежності від його міцності на розтяг, товщини захисного шару (a , мм), діаметра арматури (d , мм) та параметра $\frac{a}{R}$.

Таким чином, для більшості залізобетонних конструкцій $\frac{a}{R} > 0.73$, а отже, тріщина, що виникає внаслідок корозії арматури, повинна з'явитися на контурі отвору.

Конструкції, що проектуються згідно з діючими нормами, характеризуються ділянкою кривих на рис.3, для якого значення параметра $\frac{a}{R}$ знаходиться в межах від 1 до 2,5.

Таблиця 2.5 - Тиск продуктів корозії P в $\text{кг}/\text{см}^2$, що відповідає руйнуванню захисного шару

Показники	Діаметр арматури d , мм															
	1		5				10					20				
Товщина захисного шару, a , мм	2	5	2	5	10	20	2	5	10	20	30	5	10	20	30	40
Співвідношення товщини захисного шару до радіусу арматури $\frac{a}{R}$	4	10	0,8	2	4	8	0,4	1	2	4	6	0,5	1	2	3	4
Міцність бетону захисного шару на розтяг $\sigma_{x,R}$																
5 $\text{кг}/\text{см}^2$	4,6	4,95	2,65	4	4,6	4,85	1,6	3	4	4,6	4,8	1,55	3	4	4,4	4,5
15 $\text{кг}/\text{см}^2$	13,85	14,85	7,9	12	13,85	14,5	4,85	9,05	12	13,85	14,4	4,7	9,05	12	13,2	13,85
30 $\text{кг}/\text{см}^2$	27,7	29,7	15,8	24	27,7	29	9,7	18,5	24	27,7	28,8	9,35	18,1	24	26,4	27,7

Зрозуміло, що для цієї перехідної області в досить вузьких межах, в залежності від діаметру арматури можливе невелике збільшення товщини захисного шару, яке різко підвищує надійність залізобетонної конструкції. Подібним же чином зменшення товщини захисного шару може призвести до протилежного ефекту.

Слід зазначити, що норми іноді дозволяють проектування залізобетонних конструкцій, у яких параметр $\frac{a}{R}$ наближається до 1, в той час як за деякими іншими нормами товщина захисного шару призначається такою, що значення параметра $\frac{a}{R}$ знаходиться в межах 2-3, а для агресивних умов досягає і більших значень. З наведених в табл.1 даних ясно, що у відношенні зруйнованого захисного шару армоцементні конструкції з арматурної сіткою з дроту діаметром 1 мм і товщиною захисного шару 5 мм знаходиться в більш сприятливому становищі, ніж, наприклад, конструкції, армовані стрижнями діаметром 20 мм при товщині захисного шару 40 мм. Товщина захисного шару повинна, очевидно, призначатися теж в залежності від діаметра арматури. Відповідні вказівки зазначені у нормах, однак, вони повинні бути більш диференційовані.

Як відомо, в даний час відсутнє ясне наукове обґрунтування вибору товщини захисного шару. Наведена вище оцінка товщини захисного шару як чинника, що впливає на ймовірність руйнування бетону продуктами корозії арматури, збігається з нормованою товщиною захисного шару, яка встановлюється на основі накопиченого досвіду застосування залізобетонних конструкцій в різних умовах.

Було б, однак, невірно вважати, що збільшення захисного шару і підвищення міцності бетону лише створює додатковий опір тиску зростаючих продуктів корозії. У зв'язку з самогальмуванням корозії стали воно позначається вельми істотно і на часі всього корозійного процесу.

Відомо, що окислення багатьох металів сповільнюється з часом, оскільки на поверхні металу утворюється захисна окисна плівка, яка гальмує корозію. Зменшення швидкості корозії характерно і для сталі, що знаходиться в самих різних умовах, і в тому числі в бетоні [87].

Гальмування процесу найчастіше відбувається за рахунок зменшення швидкості дифузії через окисну плівку кисню, яка є катодним деполяризатором. Вважається [88], що окислення найчастіше протікає за параболічним законом, і зв'язок між товщиною окисної плівки δ_k , що утворюється на поверхні металу, і часом корозії τ може бути виражена залежністю:

$$\delta_k^2 = k\tau, \quad (2.36)$$

де k – константа, в яку входить коефіцієнт дифузії, концентрація кисню та деякий числовий коефіцієнт.

Припустимо, що до утворення тріщини та руйнування захисний шар працює в пружній стадії, тобто деформації ε_x бетону захисного шару пропорційні напруженням σ_x , і запишемо спрощений вираз

$$\varepsilon_{x,R} = \frac{1}{E} \sigma_{x,R}. \quad (2.37)$$

де E – модуль пружності бетону, а індекси x та R тут і в подальшому вказують, що вираз стосується бетону, відповідно на межі напівплощини і на контурі отвору (див. рис. 2.10).

В першому наближенні деформації бетону захисного шару ε_x з умови нерозривності деформацій лінійно пов'язані з ростом товщини δ_k окисної

плівки на сталі. Звідси, з урахуванням рівнянь (2.36) та (2.37), отримаємо залежність між напруженням в бетоні захисного шару $\sigma_{x,R}$ і часом корозії τ :

$$\sigma_{x,R}^2 = f\tau, \quad (2.38)$$

де f – коефіцієнт пропорційності.

З рівняння (2.38) ясно, що для двох конструкцій з різною товщиною і якістю бетону захисного шару, при постійних умовах окислення (тобто для даної арматури в конкретних умовах, при постійному парціальному тиску кисню і т.п.), відношення часу корозії сталі до руйнування захисного шару (довговічність конструкції) пропорційно відношенню квадратів граничних напружень, що викликають руйнування захисного шару:

$$\frac{\tau_{(1)}}{\tau_{(2)}} = \frac{\bar{\sigma}_{(1)x,R}^2}{\bar{\sigma}_{(2)x,R}^2}. \quad (2.39)$$

Таким чином, довговічність конструкції, у якої для руйнування захисного шару необхідні, наприклад, втричі більші напруження, збільшується в 9 разів і т.п.

Оскільки напруження σ_x в бетоні захисного шару є функцією тиску продуктів корозії P , тобто $\sigma_{x,R} = P_{x,R}P$, де значення $P_{x,R}$ очевидні з виразів (2.31) та (2.34), то і максимальні напруження $\sigma_{x,R}$ відповідно дорівнюють $\bar{\sigma}_{x,R} = P_{x,R}P$, де $P_{x,R}$ визначається з виразів (2.32) та (2.34).

Враховуючи вираз (2.39), можна встановити залежність між довговічністю конструкції τ і тиском P , який необхідний для руйнування захисного шару.

Опускаючи ряд очевидних перетворень, запишемо ці залежності для цікавих випадків:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{1}{a_{R,R}^2} \cdot \frac{P_2^2}{P_1^2}, \quad (2.40)$$

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{1}{\beta_{R,R}^2} \cdot \frac{P_2^2}{P_1^2}, \quad (2.41)$$

де

$$a_{R,R} = \frac{\left[\left(\frac{a_1}{R} \right)^2 + 2 \frac{a_1}{R} + 2 \right] \left[\left(\frac{a_2}{R} \right)^2 + 2 \frac{a_2}{R} \right]}{\left[\left(\frac{a_1}{R} \right)^2 + 2 \frac{a_1}{R} \right] \left[\left(\frac{a_2}{R} \right)^2 + 2 \frac{a_2}{R} + 2 \right]}, \quad (2.42)$$

при $a_1 < a_2$ та $\frac{a_1}{R} > 0.73$ та

$$\beta_{x,R} = \frac{4 \left[\left(\frac{a_2}{R} \right)^2 + 2 \frac{a_2}{R} \right]}{\left[\left(\frac{a_1}{R} \right)^2 + 2 \frac{a_1}{R} \right] \left[\left(\frac{a_2}{R} \right)^2 + 2 \frac{a_2}{R} + 2 \right]}. \quad (2.43)$$

Співвідношення довговічностей τ_2 та τ_1 вказує у скільки разів збільшується довговічність конструкцій при збільшенні тиску \bar{P} , необхідного для руйнування захисного шару.

В табл. 2.6 для різних поєднань значень безрозмірних параметрів двох залізобетонних конструкцій $\frac{a_1}{R}$ та $\frac{a_2}{R}$, вибраних стосовно даних табл. 2.5, приводяться значення коефіцієнтів $a_{R,R}$ та $\beta_{x,R}$.

Таблиця 2.6 – Значення коефіцієнтів $a_{R,R}$ в залежності від сполучень значень $\frac{a_1}{R}$ та $\frac{a_2}{R}$

Сполучення значень $\frac{a_1}{R}$ та $\frac{a_2}{R}$		$a_{R,R}$	$\beta_{x,R}$	
$\frac{a_1}{R} = 0,33$	$\frac{a_2}{R} =$	1,0	-	3,11
		2,0	-	4,15
		3,0	-	4,58
		4,0	-	4,79
$\frac{a_1}{R} = 0,5$	$\frac{a_2}{R} =$	1,0	-	1,92
		2,0	-	2,56
		3,0	-	2,82
		4,0	-	2,95
$\frac{a_1}{R} = 0,67$	$\frac{a_2}{R} =$	2,0	-	1,79
		3,0	-	1,96
		4,0	-	2,06
$\frac{a_1}{R} = 1,0$	$\frac{a_2}{R} =$	2,0	1,33	-
		3,0	1,47	-
		4,0	1,54	-

Оскільки максимальний тиск \bar{P} є функцією параметра $\frac{a}{R}$ та міцності бетону при розтягненні $\bar{\sigma}$, то і довговічність τ є функцією цих же величин:

$$\tau = \Phi\left(\frac{a}{R}, \bar{\sigma}\right). \quad (2.44)$$

З табл. 2.6 ясно, що при грубому порушенні захисного шару, поганій якості бетону і т.п., тиск продуктів корозії може значно знижуватися в

порівнянні з раціонально запроєктованою і якісно виконаною залізобетонною конструкцією.

Так, наприклад (див. табл. 2.5), максимальний (критичний) тиск продуктів корозії \bar{P}_2 арматурного стержня діаметром 20 мм ($R=10$ мм) при товщині захисного шару $a_2 = 20$ мм і міцності бетону на розтяг $\bar{\sigma}_2 = 30$ кг/см² складає $\bar{P}_2 = 24,0$ кг/см², а при зменшенні захисного шару до $a_1 = 10$ мм і міцності бетону до $\bar{\sigma}_1 = 5$ кг/см² складає 3,0 кг/см². Оскільки в даному випадку $a_{R,R} = 1,33$ (див. табл. 2), то підстановка в формулу (10) дає результат $\frac{\tau_2}{\tau_1} = 36$.

Таким чином, довговічність залізобетонної конструкції при зменшенні товщини і міцності захисного шару може зменшуватися в багато разів. Проведені вище розрахунки не враховують деяких обставин, які, ймовірно, призводять до ще більшого впливу товщини і якості захисного шару бетону на довговічність залізобетонної конструкції. Підвищений опір захисного шару тиску продуктів корозії приводить до їх ущільнення, що істотно впливає на кінетику корозійного процесу, приводячи до ще більшого ускладнення дифузії агресивних агентів (стимуляторів і деполяризаторів) до поверхні стали. Сам захисний шар бетону при збільшенні його товщини надає підвищений опір підводу агентів, які сприяють корозії, до поверхні арматури, оскільки швидкість дифузії для випадку стаціонарної дифузії обернено пропорційна товщині шару, в якому дифузія відбувається.

Крім цього, залежність товщини плівки від часу корозії, апроксимована у виразі (2.36) квадратної параболою, в цілому ряді випадків описується кубічною параболою $\delta_k^2 = k\tau$ [88], що природно, призводить до ще більшої залежності довговічності конструкції від якості бетону і товщини захисного шару, ніж це впливає з виразу (2.36).

Завдяки пластичним властивостям бетону збільшення товщини захисного шару повинно призводити до підвищення граничних напружень на контурі отвору і тим самим збільшувати довговічність конструкції.

Усадкові тріщини і мікротріщини, недостатнє ущільнення бетону (раковини і порожнечі), погана якість бетону в захисному шарі внаслідок розшарування бетонної суміші, ускладненого її укладання в густоармованих і нераціонально запроектованих конструкціях і інші причини, що знижують міцність бетону в захисному шарі при розтягуванні, можуть різко знизити довговічність залізобетонної конструкції.

На основі виразу (2.39) можна зробити висновок про ефективність спеціального, в тому числі дисперсного армування бетону захисного шару, значно підвищує його міцність при розтягуванні. Можна також провести орієнтовну порівняльну економічну оцінку заходів щодо підвищення якості бетону в захисному шарі - збільшення витрати цементу, підвищення витрат по догляду за бетоном і т.п. Аналогічно може бути оцінена і порівняльна ефективність збільшення товщини захисного шару бетону. Очевидно, найбільшу небезпеку для залізобетонної конструкції являє середовище, агресивне одночасно і до бетону і до арматури, що має бути відображено у відповідних нормах проектування конструкцій, що експлуатуються в агресивних умовах. Особлива увага повинна бути звернена на забезпечення товщини захисного шару.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. З використанням відомих досліджень та відомостей про механізм корозії бетону в рідких середовищах було запропоновано залежності, що описують кінетику сульфатної корозії при змінній температурі експлуатаційного середовища.

2. Запропонована залежність для визначення ефективного коефіцієнта дифузії іонів в бетоні в залежності від температури, параметрів структури бетону, накопичення продуктів реакції агресивного сульфатного середовища зі складовими бетону, розрихлення структури внаслідок внутрішніх напружень.

3. Для прогнозування зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища було розроблено алгоритм прогнозування зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища. Для реалізації запропонованого алгоритму розроблено розрахунковий модель в програмному комплексі MathCAD 15.

4. В результаті чисельного експерименту встановлено вплив температури середовища при сульфатній корозії та отримані дані щодо розподілу концентрацій взаємодіючих речовин (сульфат-іонів, іонів кальцію, гідроалюмінату кальцію та зв'язаних сульфат-іонів) по глибині бетону від його зовнішньої поверхні.

5. Довговічність залізобетонної конструкції істотно нелінійно залежить від міцності і товщини захисного шару бетону. У деякому інтервалі величин захисних шарів порівняно невелика зміна товщини захисного шару призводить до різкої зміни довговічності конструкції. Призначення раціональної величини захисного шару бетону, заходи щодо забезпечення проектної величини захисного шару при виготовленні залізобетону і підвищення міцності при розтягуванні бетону в захисному шарі, поряд із щільністю бетону, мають вирішальне значення для підвищення довговічності

залізобетонних конструкцій. Оцінка оптимальної величини захисного шару, зроблена виходячи з умов його руйнування накопичуються продуктами корозії арматури, збігається з нормованими товщинами захисних шарів, що встановлюються на основі тривалої експлуатації залізобетонних конструкцій.

Результати, наведені в розділі, опубліковані в таких роботах автора [89-94].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДА ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ ЗАХИСНОГО ШАРУ ПРИ СУЛЬФАТНІЙ КОРОЗІЇ В ҐРУНТАХ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ СЕРЕДОВИЩА

3.1 Фактори формування температурного режиму ґрунтів

Температура ґрунту як середовища експлуатації будівельних конструкцій є одним з найважливіших параметрів, що впливає на їх довговічність. Вимірювання реального температурного профілю ґрунту на практиці є складним процесом, що потребує значних трудовитрат. З огляду на це розробка чисельної моделі розрахунку коливань температури ґрунту на різних глибинах може бути корисним інструментом для прогнозування довговічності.

Тепловий режим ґрунту поверхневих шарів Землі формується під дією двох основних чинників - падаючої на поверхню сонячною радіацією і потоком радіогенного тепла із земних надр. Сезонні і добові зміни інтенсивності сонячної радіації і температури зовнішнього повітря викликають коливання температури верхніх шарів ґрунту. Глибина проникнення добових коливань температури зовнішнього повітря і інтенсивності падаючої сонячної радіації залежно від конкретних ґрунтово-кліматичних умов коливається в межах від декількох десятків сантиметрів до півтора метрів. Глибина проникнення сезонних коливань температури зовнішнього повітря і інтенсивності падаючої сонячної радіації не перевищує, як правило, 15-20 м.

Температурний режим шарів ґрунту, розташованих нижче за цю глибину («нейтральної зони»), формується під впливом теплової енергії, що поступає з надр Землі і практично не залежить від сезонних, а тим більше добових змін параметрів зовнішнього клімату. Температура ґрунту

обумовлюється сукупністю процесів надходження, переносу, акумуляції і віддачі тепла. Математично тепловий режим ґрунту характеризується з допомогою радіаційного і теплового балансу.

Тепловий баланс визначається сукупністю явищ поглинання, переміщення і віддачі тепла, і описується розподілом температур на різній глибині і в різні періоди. Розрізняють добові і річні коливання температур в ґрунті. Найбільше коливання температур спостерігається у верхньому шарі ґрунту та поступово зменшується до глибини 5 м.

Тепловий режим ґрунту характеризується тепловим балансом і в загальному вигляді описується рівнянням [95]:

$$R = LE + P + A, \quad (3.1)$$

де R - тепловий баланс;

P - передача тепла з ґрунту в атмосферу;

A - витрата тепла на нагрівання ґрунту;

L - добова теплота випаровування;

E - сумарне випаровування за розрахунковий період часу.

Добові і річні коливання температури поверхні ґрунту внаслідок теплопровідності передаються в більш глибокі її шари. Поширення температурних коливань вглиб ґрунту (при однорідному складі ґрунту) відбувається у відповідності з наступними закономірностями:

- період коливань з глибиною не змінюється, тобто як на поверхні ґрунту, так і на всіх глибинах інтервал між двома послідовними мінімумами і максимумами температури становить в добовому ході 24 годин, а в річному 12 місяців.

- якщо глибина зростає в арифметичній прогресії, то амплітуда зменшується в геометричній прогресії, тобто зі збільшенням глибини амплітуда швидко зменшується.

– шар ґрунту, температура в якому протягом доби не змінюється, називають шаром добової температури. У середніх широтах цей шар починається з глибини 70-100 см.

Максимальні і мінімальні температури на глибинах настають пізніше, ніж на поверхні ґрунту. Це запізнення прямо пропорційно глибині. Добові максимуми і мінімуми запізнюються на кожні 10 см глибини в середньому на 2,5-3,5 ч, а річні на кожен метр глибини запізнюються на 20-30 діб.

У північних широтах глибина проникнення річного ходу температури ґрунту для території України становить близько 10 м.

Глибина, до якої проявляється річний хід температури ґрунту, повинна приблизно в 19 разів перевищувати глибину прояви добових коливань. В реальних умовах спостерігаються значні відхилення від теоретичних розрахунків, і в багатьох випадках глибина проникнення річних коливань виявляється більше розрахункової. Це зумовлено відмінностями у вологості ґрунту по глибинах і в часі, зміною теплопровідності ґрунту з глибиною і іншими причинами.

3.2 Розробка аналітичної моделі розподілу температури ґрунту по глибині

Розробка розрахункової моделі розподілу температури ґрунту по глибині виконувалась виходячи з врахування повного теплового балансу поверхні ґрунту, що включає:

- довгохвильове випромінювання;
- короткохвильове випромінювання (сонячна радіація, що поглинається поверхнею);
- теплопровідність ґрунту, тобто здатність ґрунту проводити теплоту від нагрітих шарів до холодних;

- конвективний теплообмін;
- ефект випаровування.

Теоретичні передумови для розробки моделі:

- застосовуються положення теорія стаціонарної теплопередачі, тобто вважається, що ґрунт є однорідним середовищем за характеристиками теплопровідності;
- теплова дифузія ґрунту вважається постійною у всіх напрямках;
- температура поверхні, що зазнає атмосферних впливів, періодично змінюється з часом.

Рівняння теплового балансу поверхні має наступний вигляд:

$$K_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = R_{nl} - R_{ns} - H_{conv} - H_{ev}, \quad (3.2)$$

де K_s – теплопровідність ґрунту, Вт/м·К;

T_s – температура ґрунту, °С;

y – глибина, на якій визначається температура, м

R_{ns} – короткохвильове випромінювання (сонячна радіація), що поглинається поверхнею, Вт/м²;

R_{nl} – чисте довгохвильове сонячне випромінювання, відбите земною поверхнею, Вт/м²;

H_{conv} – тепловтрати внаслідок явища конвекції

H_{ev} – тепловтрати внаслідок випаровування

Короткохвильове випромінювання (сонячна радіація), що поглинається земною поверхнею R_{ns} , визначається множенням короткохвильового випромінювання, що попадає на горизонтальну поверхню (інсоляція), на поглинаючу здатність поверхні.

Короткохвильовим випромінюванням, також відомим як інсоляція, називається повне сонячне опромінення, що падає на поверхню Землі.

Інсоляція вимірюється числом одиниць енергії, падаючої на одиницю поверхні за одиницю часу. Зазвичай інсоляцію вимірюють в Вт·год / м².

Згідно рекомендацій [97] поглинаюча здатність для земної поверхні з рослинним покривом може бути прийнята такою, що дорівнює $\alpha=0,77$.

Таким чином, формула для визначення величини сонячної радіації, що поглинається земною поверхнею, матиме вигляд:

$$R_{ns} = \alpha R_s, \quad (3.3)$$

де R_s – кількість короткохвильового випромінювання, що попадає на горизонтальну поверхню, Вт·год/м².

Чисте довгохвильове сонячне випромінювання, відбите земною поверхнею в загальному вигляді виражається законом Стефана-Больцмана. Оскільки атмосфера характеризується наявністю водяних парів та хмарності, які відіграють значну роль у поглинанні та відбитті сонячної радіації, то рівняння для визначення чистого довгохвильового сонячного випромінювання, відбитого земною поверхнею, в рекомендаціях [99] пропонується у наступному вигляді:

$$R_{nl} = \sigma T_{mean}^4 (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right), \quad (3.4)$$

де σ - константа Стефана-Больцмана, $2,042 \cdot 10^{-10}$ МДж/К⁴·м²·год;

T_{mean} – середня добова температура, °С;

e_a – фактичний тиск пари повітря, кПа;

R_s – виміряне падаюче короткохвильове випромінювання на горизонтальній поверхні, МДж/год;

R_{so} – теоретична короткохвильова сонячна радіація за умови чистого неба, МДж/м²·год.

Для практичного застосування було побудовано графік зміни величини σT_{mean}^{-4} при різних значеннях середньої добової температури, який приведено на рис. 3.1.

У вищенаведеній формулі величина $(0.34 - 0.14\sqrt{e_a})$ відображає вплив вологості повітря.

Фактичний тиск пари повітря може бути визначений за формулою:

$$e_a = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T_{mean}}{T_{mean} + 237.3} \right], \quad (3.5)$$

де T_{mean} – середня добова температура повітря, °С.

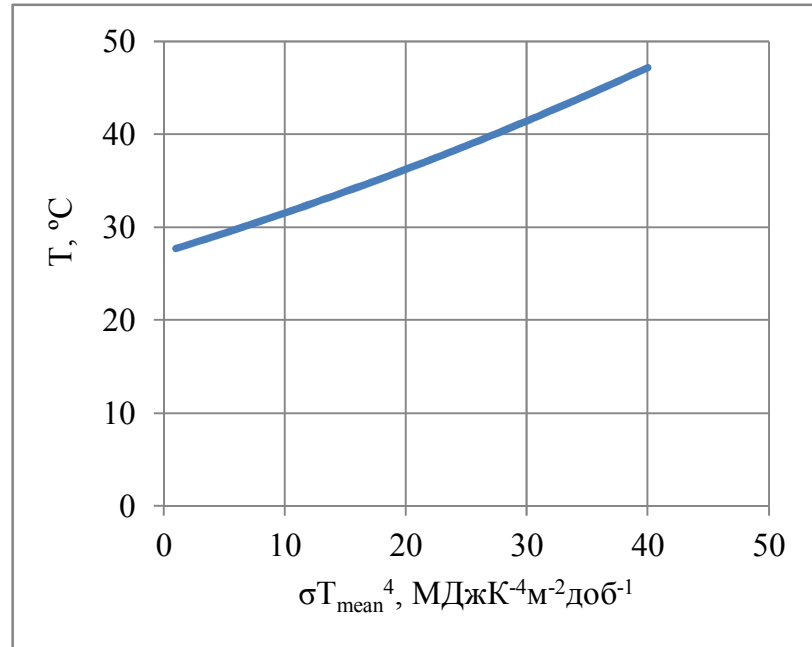


Рисунок 3.1 – Графік зміни величини σT_{mean}^{-4} при різних значеннях середньої добової температури (T, °C)

Величина $(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)$ враховує ефект хмарності. Значення знаходиться в межах:

$$0.05 \leq (1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \leq 1.0, \quad (3.6)$$

При цьому мінімальне значення відповідає максимальній хмарності або нічному періоду, а максимальне – денному періоду в безхмарну пору доби.

Втрати тепла внаслідок явища конвекції визначаються за формулою:

$$H_{conv} = h_c (T_a - T_s), \quad (3.7)$$

де T_s – температура ґрунту на поверхні, °С;

T_a – температура повітря, °С;

h_c – коефіцієнт конвекції (теповіддачі), Вт/м²×К.

Коефіцієнт конвекції (теповіддачі) h_c характеризує інтенсивність тепловіддачі з поверхні і визначається як кількість теплоти, яка передана в одиницю часу через одиницю площі поверхні за різниці температур 1 К між поверхнею та середовищем-теплоносієм. Формула для визначення коефіцієнту конвекції земної поверхні записується наступним чином:

$$h_c = \frac{1}{208} \rho_a c_{pa} u_{wind}, \quad (3.8)$$

де ρ_a – густина повітря, кг/м³;

c_{pa} – питома теплоємність повітря, Дж/кг·К;

u_{wind} – швидкість вітру, м/с;

Коефіцієнт $\frac{1}{208}$ враховує аеродинамічний опір повітря і є справедливим лише для еталонної поверхні землі з рослинним покривом.

Густина та питома теплоємність повітря є змінними, що залежать від температури повітря, тим не менше ці величини не мають значного впливу на коефіцієнт конвекції. Для практичних розрахунків можуть бути прийняті значення $\rho_a = 1,205 \text{ кг/м}^3$ та $c_{pa} = 1005 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ [99].

Сумарна втрата води через випаровування - це кількість вологи, що переходить в атмосферу у вигляді пари в результаті фізичного випаровування з ґрунту і з поверхні рослинності. При випаровуванні води з поверхні, її температура зменшиться, оскільки велика кількість тепла поглинається водою в процесі зміни фаз.

Тепловитрати внаслідок випаровування можуть бути розраховані шляхом множення швидкості втрати води ET на густину води ρ_w та кількість тепла, що виділяється при випаровуванні води, L_w .

Формула для визначення тепловитрат внаслідок випаровування може бути записана наступним чином:

$$H_{ev} = \rho_w L_w ET, \quad (3.9)$$

де ρ_w – густина води, кг/м^3 ;

L_w – тепло, що виділяється при випаровуванні води, Дж / кг ;

ET – втрата води через випаровування, м/с ;

Втрати води з поверхні землі через випаровування ET можуть бути визначені методом Пенмана-Монтейта, який дозволяє розрахувати випаровування води з поверхонь, вкритих рослинністю та детально приведений в [86].

Оскільки явище тепловитрат через випаровування впливає на розподіл температур в ґрунті на глибинах до 0,2 м [95, 98], зміна величини

температури ґрунту по глибині внаслідок випаровування в подальшому не враховується.

3.3 Результати моделювання розподілу температури в ґрунті (на прикладі м. Дніпро)

Моделювання розподілу температури в ґрунті було виконано на прикладі м. Дніпро. Необхідні вихідні дані приймалися згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010«Будівельна кліматологія» [100]. В табл. 3.1 приведені дані щодо середньої добової температури, в табл. 3.2 - по місяцях щодо швидкості вітру на території України.

Таблиця 3.1 – Характеристика середньої добової температури по місяцях (для м. Дніпро)

Місяць	Середня добова температура по місяцях											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Середня добова температура, T_{mean} , °C	-4,7	-3,8	1,1	9,6	16	19,6	21,6	20,7	15,4	8,6	2,2	-2,5

Таблиця 3.2 – Характеристика вітру по місяцях (для м. Дніпро)

Вітер	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Переважаючий напрям вітру	З	Сх	Сх	Сх	Пн	Пн	Пн	Пн	Пн	Пн	З	З
Середня швидкість вітру, м/с	5,2	5,5	5,2	4,9	4,3	3,9	3,8	3,9	4,1	4,6	4,9	5,0

Характеристики теплопровідності ґрунтів були експериментально визначені в роботі [101]. На основі експериментальних даних були отримані емпіричні залежності для визначення коефіцієнта теплопровідності ґрунтів в залежності від їх типа, які мають наступний вигляд:

– для піщаних ґрунтів

$$\lambda = aW + c; \quad (3.10)$$

– для супісків

$$\lambda = ae^{cW}; \quad (3.11)$$

– для суглинків

$$\lambda = a_1W^2 - a_2W + c, \quad (3.12)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°К);

W – вологість ґрунту;

a, c – емпіричні коефіцієнти.

З використанням вищенаведених залежностей за умови вологості ґрунта 20% були визначені коефіцієнти теплопровідності для піщаних ґрунтів, супісків та суглинків, наведені в табл. 3.3.

Отримані теоретичні дані моделювання розподілу температури по глибині піщаного ґрунту протягом року для поверхні (глибина 0 м) та на глибині 0,5, 1, 2 та 3 м приведені на рис. 3.2.

Розподіл температури по глибині піщаного ґрунту для січня, квітня, липня та жовтня місяця приведені на рис. 3.3.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти теплопровідності для піщаних, глинистих ґрунтів та суглинків при вологості 20%

Тип ґрунту	Значення коефіцієнтів		Теплопровідність ґрунтів, Вт/(м·°К)
	а	с	
Пісок	0,393	1,27	1,35
Супісок	1,735	0,4	0,9
Суглинок	0,273	4,925	0,75

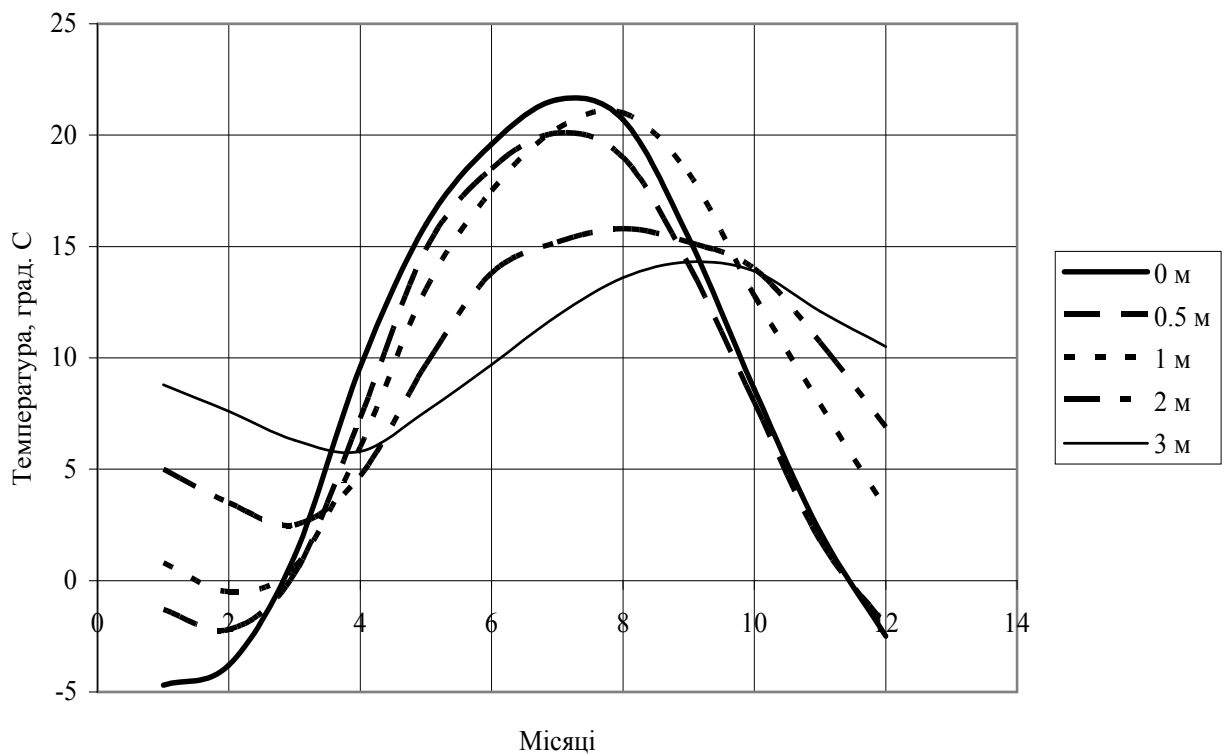


Рисунок 3.2 – Результати моделювання розподілу температури по глибині піщаного ґрунту (для м. Дніпро)

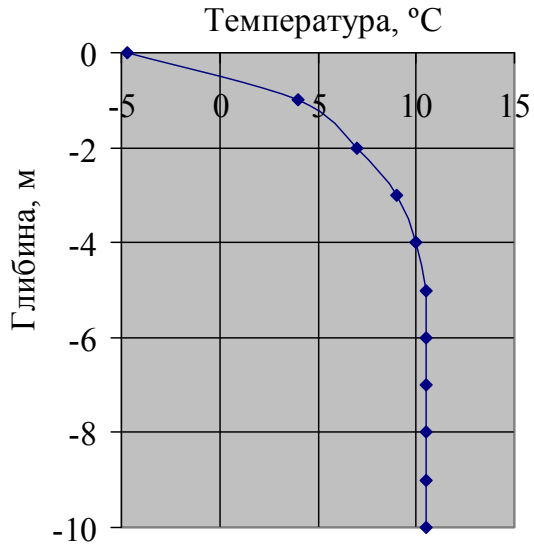
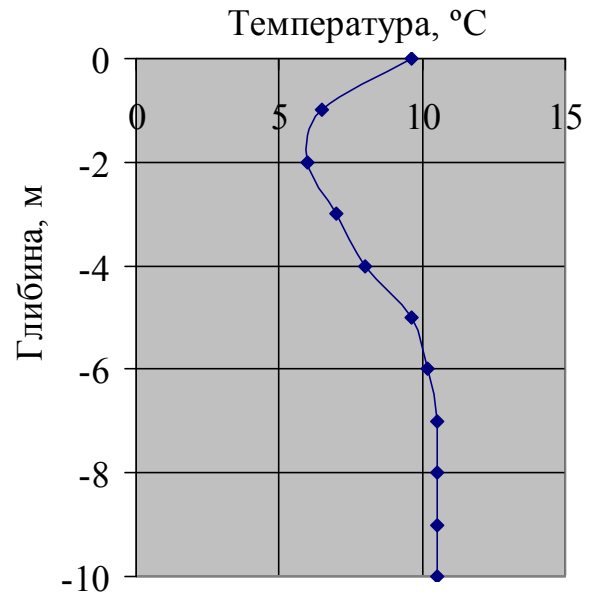
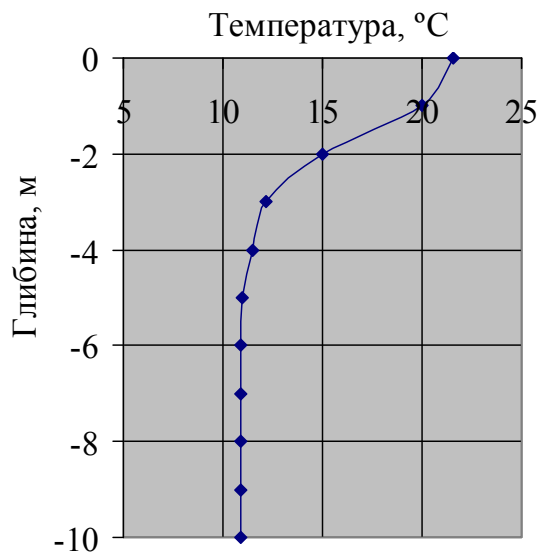
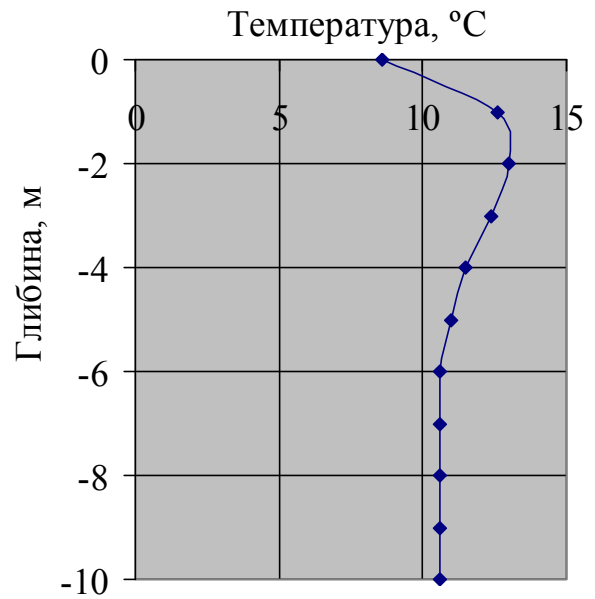
*a**б**в**г*

Рисунок 3.3 – Розподіл температури по глибині піщаного ґрунту для місяців:

a – січня; *б* – квітня; *в* – липня; *г* – жовтня

3.4 Прогнозування довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті з урахуванням температури середовища

Прогнозування довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті з урахуванням температури середовища виконано на прикладі залізобетонної палі квадратного поперечного перерізу.

На зміну параметрів корозійного процесу впливає безліч факторів, таких як хіміко-мінералогічний склад бетону, концентрація агресивних середовищ, вид катіона, умови взаємодії середовища і конструкції (характер і режим впливу) і т.д. При різних схемах взаємодії, розподіл сульфат-іонів в перерізі бетонної конструкції буде різним.

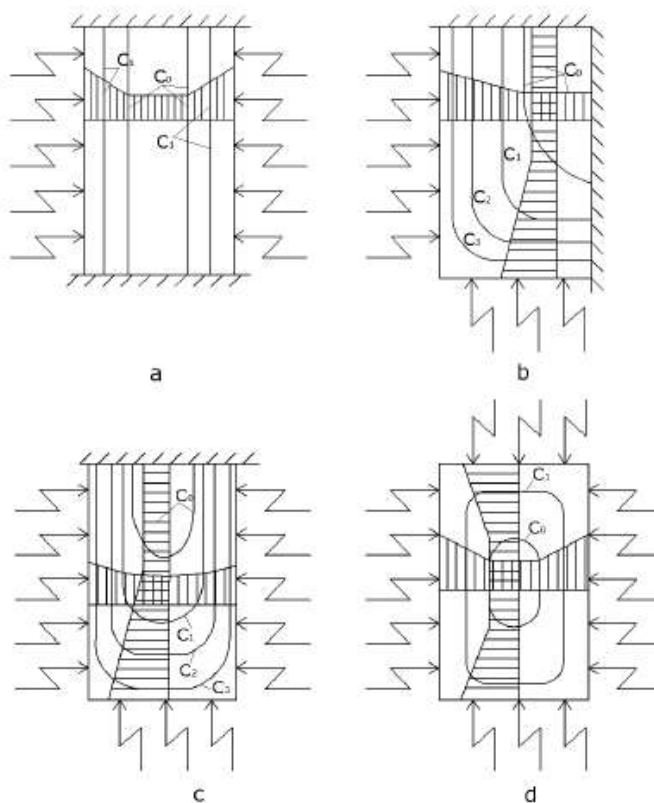


Рисунок 3.4 – Ізолінії розподілу сульфат-іонів в перерізі бетонної конструкції при різних схемах впливу середовища а - середовище впливає на дві протилежні сторони; б - середовище впливає на дві суміжні сторони; с - середовище впливає на три сторони; д - середовище впливає на конструкцію з усіх боків

У випадку залізобетонної палі, що занурена в ґрунт, агресивне середовище впливає на конструкцію з усіх сторін. Схема розподілу сульфат-іонів у даному випадку приведена на рис. 3.4, б.

Особливістю процесу корозії є те, що в початковий період експлуатації будівлі йде збільшення міцності бетону конструкцій. Після стадії зміцнення настає стадія зниження міцності. Бетон знову досягає початкового значення, після чого починає знеміцнюватися. Зміна площі робочого перерізу може бути умовно визначена за схемою на рис. 3.5.

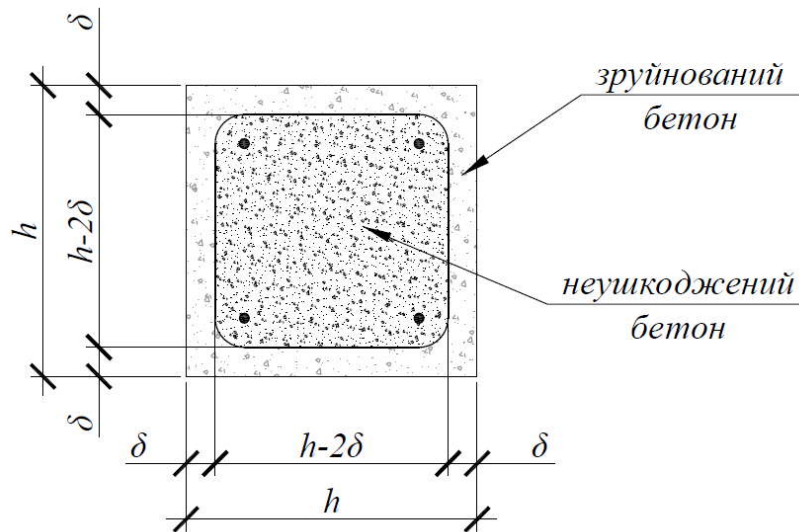


Рисунок 3.5 – Схема поперечного перерізу залізобетонного елемента при сульфатній корозії: h – розмір сторони перерізу; δ – глибина ушкодження бетону

Для прогнозування зміни міцності бетонних і залізобетонних конструкцій в умовах сульфатного агресивного середовища використовуються залежності, що описують поглинання цементним каменем сульфат-іонів з урахуванням температури середовища, а також встановлюють зв'язок між фізико-механічними характеристиками бетону і кількістю зв'язаних сульфат-іонів.

Оцінка процесу деградації бетону в умовах сульфатної корозії проводилась з використанням розрахункового модуля, розробленого в розділі 2, на прикладі бетону з характеристиками, приведеними в табл. 2.3, 2.4. Для визначення глибини ушкодження бетону розглядалися три типи середовища:

- 1) кількість сульфатів 15 г/л в перерахунку на SO_4^{2-} ;
- 2) кількість сульфатів 30 г/л в перерахунку на SO_4^{2-} ;
- 3) кількість сульфатів 50 г/л в перерахунку на SO_4^{2-} .

З урахуванням температури середовища були отримані теоретичні дані щодо глибини деградації бетону, приведені в табл. 3.4 – 3.6.

Таблиця 3.4 - Параметри деградації бетону в умовах сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-}=15$ г/л

Термін впливу, роки	Глибина ушкодження бетону, см, при температурі				
	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C
5	0,1	0,15	0,25	0,3	0,35
10	0,25	0,3	0,45	0,5	0,55
25	1,15	1,3	1,4	1,5	1,65
50	1,9	2,3	2,45	2,55	2,7
100	2,4	2,8	3,05	3,15	3,3

Таблиця 3.5 - Параметри деградації бетону в умовах сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л

Термін впливу, роки	Глибина ушкодження бетону, см, при температурі				
	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C
5	0,2	0,3	0,35	0,45	0,55

Продовження табл. 3.5

10	0,5	0,55	0,65	0,7	0,75
25	1,45	1,7	1,85	1,9	2,0
50	2,15	2,55	2,65	2,75	2,9
100	2,65	3,15	3,3	3,45	3,55

Таблиця 3.6 - Параметри деградації бетону в умовах сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-}=50$ г/л

Термін впливу, роки	Глибина ушкодження бетону, см, при температурі				
	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C
5	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6
10	0,55	0,6	0,7	0,75	0,85
25	1,7	2,1	2,15	2,3	2,5
50	2,4	2,8	2,95	3,1	3,3
100	2,75	3,3	3,5	3,65	3,75

Як видно з графіків на рис. 3.5, занурена у ґрунт залізобетонна палля протягом періоду експлуатації піддається циклічному впливу змінних температур. Для аналізу впливу температури експлуатаційного середовища на довговічність залізобетонної палі скористаємося середньорічним розподілом температури по глибині ґрунту. Оскільки дифузія у рідких середовищах при від'ємних температурах практично припиняється, зимовими місяцями можна знехтувати. Тоді розрахунковий розподіл температури по глибині ґрунту для прогнозування довговічності залізобетонної палі матиме вигляд графіку на рис. 3.6.

З урахуванням розподілу температури по глибині ґрунту були отримані ізополя ушкодження захисного шару бетону через 10, 50 та 100 років

експлуатації в умовах сульфатної корозії при концентрації SO_4^{2-} 15, 30 та 50 г/л. Отримані дані приведені на рис. 3.7 – 3.9

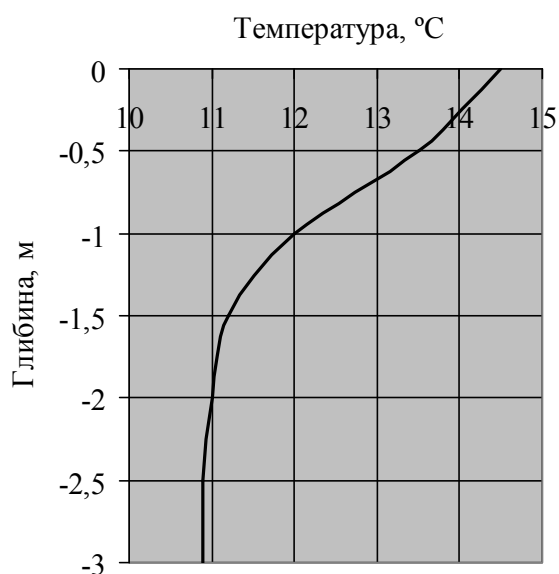


Рисунок 3.6 – Розрахунковий розподіл температури по глибині ґрунту для прогнозування довговічності залізобетонної палі

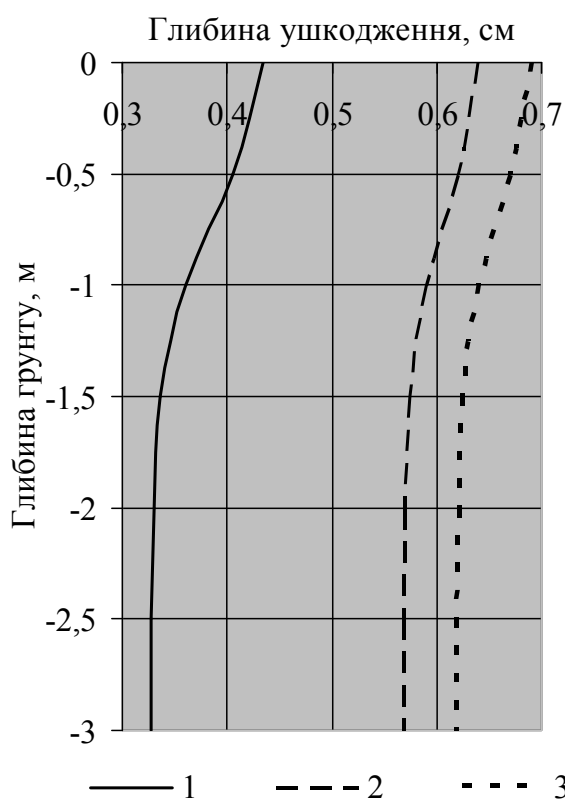


Рисунок 3.7 – Ізополі ушкодження захисного шару бетону через 10 років при концентрації SO_4^{2-} : 1 – 15 г/л, 2 – 30 г/л, 3 – 50 г/л

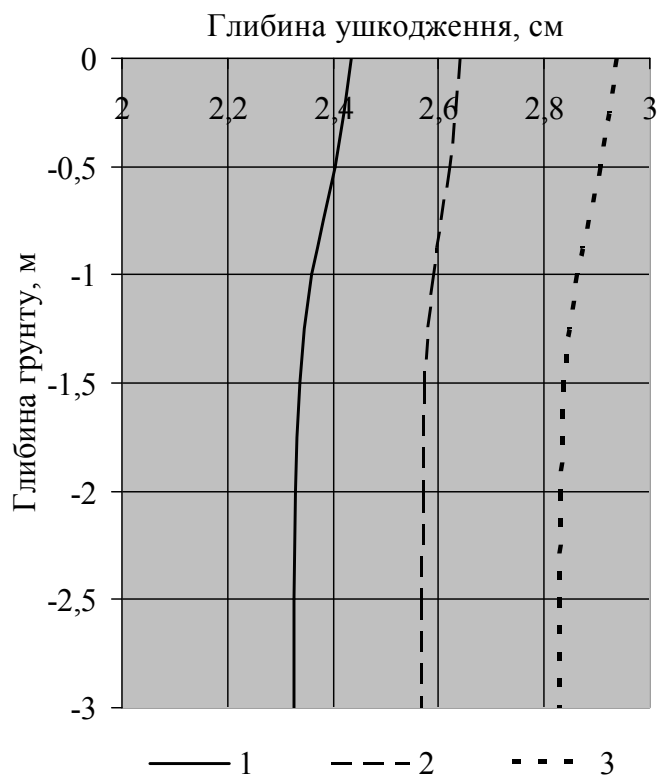


Рисунок 3.8 – Ізополя ушкодження захисного шару бетону через 50 років при концентрації SO_4^{2-} : 1 – 15 г/л, 2 - 30 г/л, 3 – 50 г/л

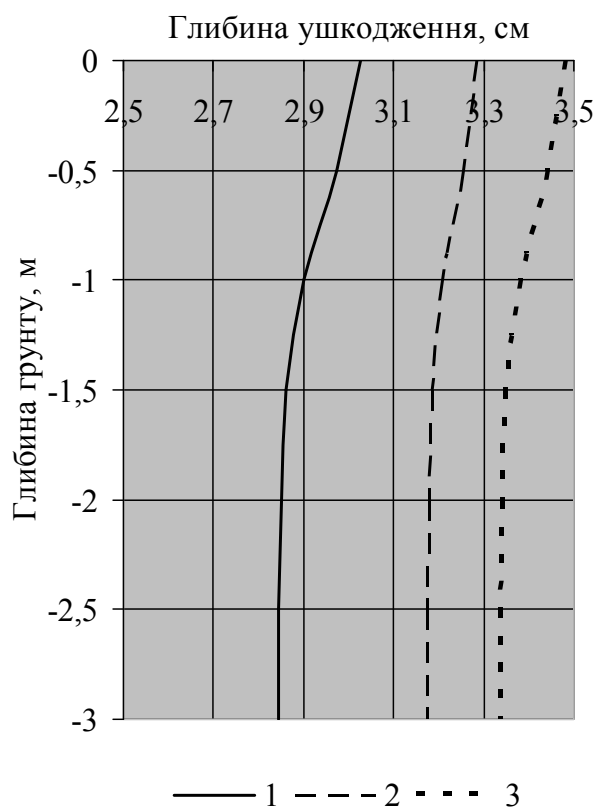


Рисунок 3.9 – Ізополя ушкодження захисного шару бетону через 100 років при концентрації SO_4^{2-} : 1 – 15 г/л, 2 - 30 г/л, 3 – 50 г/л

Окремо було виконано оцінку зміни несучої здатності залізобетонної палі в умовах сульфатної корозії. Теоретичну несучу здатність палі за матеріалом визначають з умов міцності як для центрально стиснутого елемента за формулою [102, 103]:

$$F_{d,corr}(x,t) = \gamma_c \varphi (f_{cd}(x,t) A_{c,f} + f_{yd} A_s), \quad (3.13)$$

де γ_c – коефіцієнт умов роботи (для забивних паль з розміром поперечного перерізу $b \geq 200$ мм приймається $\gamma_c = 1$);

φ – коефіцієнт поздовжнього згину, що враховується лише для достатньо великої товщі шарів слабких ґрунтів, в решті випадків $\varphi = 1$;

$f_{cd}(x,t)$ – міцність бетону в обсягу з координатою x в момент часу t при агресивному впливі сульфат-іонів;

$A_{c,f}$ – розрахункова площа поперечного перерізу бетону палі з урахуванням деградації внаслідок сульфатної корозії;

f_{yd} – розрахунковий опір арматури на стиск;

A_s – площа поперечного перерізу поздовжньої арматури.

Для визначення несучої здатності розглядалася залізобетонна паля квадратного поперечного перерізу розміром 350x350 мм, виготовлена з важкого бетону класу C20/25 та з робочою арматурою 4Ø12 з арматури класу A400C. Характеристики матеріалів палі наведені в табл. 3.7.

Дані щодо зміни несучої здатності залізобетонної палі внаслідок ушкодження бетону при сульфатній корозії через 10, 50 та 100 років експлуатації при концентрації SO_4^{2-} 15, 30 та 50 г/л приведені у табл. 3.7-3.10.

Таблиця 3.7 – Характеристики матеріалів залізобетонної палі

Матеріал	Клас міцності	Найменування і значення характеристики			
		Міцність, МПа		Модуль пружності, ГПа	Густина, кг/м ³
		розтяг	стиск		
Бетон	C20/25	1	14,5	23	2500
Арматура	A400C	375		210	7850

Таблиця 3.8 - Зміни несучої здатності залізобетонної палі внаслідок ушкодження бетону в умовах сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-}=15$ г/л

Початкова несуча здатність, $F_{d,ib}$ кН	Глибина ґрунту, м	Теоретична несуча здатність з урахуванням впливу сульфатної корозії ($F_{d,corr}$, кН) та відсоток зниження порівняно з початковим значенням ($\%_{loss}$)					
		10 років		50 років		100 років	
		$F_{d,corr}$	$\%_{loss}$	$F_{d,corr}$	$\%_{loss}$	$F_{d,corr}$	$\%_{loss}$
1861	0	1773,8	4,69	1401,1	24,71	1300,0	30,15
	0,5	1779,7	4,37	1406,3	24,43	1308,4	29,69
	1	1788,7	3,89	1414,2	24,01	1321,1	29,01
	1,5	1793,4	3,63	1418,4	23,78	1327,9	28,65
	2	1794,6	3,57	1419,5	23,72	1329,6	28,56
	2,5	1795,2	3,53	1420,0	23,70	1330,4	28,51
	3	1795,2	3,53	1420,0	23,70	1330,4	28,51

Як видно з табл. 3.8, теоретична несуча здатність залізобетонної палі з урахуванням впливу сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-}=15$ г/л через 10 років експлуатації зменшується на 3,9%, через 50 років – на 24%, 100 років - на 29 %.

Таблиця 3.9 - Зміни несучої здатності залізобетонної палі внаслідок ушкодження бетону в умовах сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л

Початкова несуча здатність, $F_{d,ib}$ кН	Глибина ґрунту, м	Теоретична несуча здатність з урахуванням впливу сульфатної корозії ($F_{d,corr}$ кН) та відсоток зниження порівняно з початковим значенням ($\%_{loss}$)					
		10 років		50 років		100 років	
		$F_{d,corr}$	$\%_{loss}$	$F_{d,corr}$	$\%_{loss}$	$F_{d,corr}$	$\%_{loss}$
1861	0	1733,5	6,85	1365,5	26,63	1256,7	32,47
	0,5	1737,4	6,64	1369,0	26,44	1261,7	32,20
	1	1743,2	6,33	1374,1	26,16	1269,1	31,80
	1,5	1746,4	6,16	1376,9	26,01	1273,1	31,59
	2	1747,2	6,12	1377,6	25,98	1274,1	31,54
	2,5	1747,6	6,10	1377,9	25,96	1274,6	31,51
	3	1747,6	6,10	1377,9	25,96	1274,6	31,51

Згідно табл. 3.9, теоретична несуча здатність залізобетонної палі з урахуванням впливу сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л через 10 років експлуатації зменшується на 6,3%, через 50 років – на 26%, 100 років - на 31,8 %.

Таблиця 3.10 - Зміни несучої здатності залізобетонної палі внаслідок ушкодження бетону в умовах сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-} = 30$ г/л

Початкова несуча здатність, $F_{d,ib}$ кН	Глибина ґрунту, м	Теоретична несуча здатність з урахуванням впливу сульфатної корозії ($F_{d,corr}$, кН) та відсоток зниження порівняно з початковим значенням ($\%_{loss}$)					
		10 років		50 років		100 років	
		$F_{d,corr}$	$\%_{loss}$	$F_{d,corr}$	$\%_{loss}$	$F_{d,corr}$	$\%_{loss}$
1861	0	1723,7	7,38	1315,2	29,33	1224,8	34,19
	0,5	1727,6	7,17	1320,2	29,06	1231,3	33,84
	1	1733,5	6,85	1327,9	28,65	1241,1	33,31
	1,5	1736,6	6,69	1331,9	28,43	1246,4	33,03
	2	1737,4	6,64	1333,0	28,37	1247,7	32,96
	2,5	1737,8	6,62	1333,5	28,35	1248,3	32,92
	3	1737,8	6,62	1333,5	28,35	1248,3	32,92

Як видно з табл. 3.10, теоретична несуча здатність залізобетонної палі з урахуванням впливу сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-} = 50$ г/л через 10 років експлуатації зменшується на 6,9%, через 50 років – на 28,7%, 100 років - на 33,3 %.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Проаналізовані та систематизовані основні фактори формування температурного режиму ґрунтів, які включають процесів надходження, переносу, акумуляції і віддачі тепла. Сформульовано рівняння теплового балансу ґрунту.

2. Виходячи з відомих даних щодо повного теплового балансу поверхні ґрунту, запропоновано аналітичну розрахункову модель розподілу температури ґрунту по глибині, що включає довгохвильове випромінювання, короткохвильове випромінювання (сонячна радіація, що поглинається поверхнею), теплопровідність ґрунту (здатність ґрунту проводити теплоту від нагрітих шарів до холодних), конвективний теплообмін та ефект випаровування.

3. Виконано моделювання розподілу температури в ґрунті на прикладі м. Дніпро. Отримані теоретичні дані розподілу температури по глибині піщаного ґрунту протягом року для поверхні (глибина 0 м) та на глибині 0,5, 1, 2 та 3 м.

4. З урахуванням розподілу температури по глибині ґрунту були отримані ізополя ушкодження захисного шару бетону через 10, 50 та 100 років експлуатації в умовах сульфатної корозії при концентрації SO_4^{2-} 15, 30 та 50 г/л та виконано оцінку зміни несучої здатності залізобетонної палі в умовах сульфатної корозії. Теоретична несуча здатність залізобетонної палі з урахуванням впливу сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-}=15$ г/л через 10 років експлуатації зменшується на 3,9%, через 50 років – на 24 %, через 100 років - на 29 %; при концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л через 10 років експлуатації зменшується на 6,3%, через 50 років – на 26%, через 100 років - на 31,8 %; при концентрації $SO_4^{2-}=50$ г/л через 10 років експлуатації зменшується на 6,9 %, через 50 років – на 28,7 %, через 100 років - на 33,3 %.

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ В
УМОВАХ СУЛЬФАТНОЇ КОРОЗІЇ З УРАХУВАННЯМ
ТЕМПЕРАТУРИ СЕРЕДОВИЩА

4.1 Теоретичне обґрунтування заходів підвищення довговічності бетону
в умовах сульфатної корозії

При проектуванні бетонних і залізобетонних конструкцій, призначених для експлуатації в агресивних середовищах, довговічність повинна забезпечуватися, головним чином, засобами первинного захисту. Критерієм забезпечення довговічності бетону в умовах сульфатної корозії є зниження міцності та руйнування захисного шару. У рідких агресивних середовищах стійкість бетону визначається такими технологічними параметрами як мінералогічний склад цементного клінкеру, склад цементу та проникність бетону.

Важливе значення при розробці бетонів стійких до сульфатної корозії має вибір виду наповнювачів. Зокрема, застосування заповнювачів з карбонатних порід за рахунок особливостей їх фізико-хімічної взаємодії з цементом дозволяє отримати бетони підвищеної сульфатостійкості. Позитивний вплив на сульфатостійкість бетонів заміни кварцового піску карбонатним обґрунтований дослідженнями [104-106].

При змішуванні цементу водою карбонатні заповнювачі вступають в реакцію з C_3A , що описується рівнянням[3, 83]:



При гідратації клінкерних мінералів, що містять C_3A та C_4AF в присутності карбонату кальцію окрім основного мінералу - гідроалюмінату

кальцію в результаті взаємодії з CaCO_3 , утворюється нове гідратне з'єднання - гідрокарбоалюмінат кальцію: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ [107]. При цьому різко зменшується кількість гідро алюмінату, що призводить до зменшення кількості гідросульфоалюмінату кальцію при взаємодії з сульфат-іонами.

Окрім цього, гідрокарбоалюмінати впливають на формування структури цементного каменю [108, 109]. Підвищення міцності цементного каменю в поєднанні з вапняком обумовлено кристалів-хімічною взаємодією, зрощенням кристалогідратів аліту та карбонату. Гідрокарбоалюмінати зростаються між собою і з поверхнею карбонатних наповнювачів в щільний конгломерат.

Таким чином, важливою особливістю карбонатних заповнювачів є те, що вони вступають в активну фізико-хімічну взаємодію з цементом, що обумовлено їх хімічною спорідненістю і близькістю параметрів кристалічних решіток [15]

Іншою важливою особливістю карбонатних наповнювачів є їхня пористість, що викликає ефект самовакуумування. Внаслідок цього відсмоктується частина води замішування і знижується водо-цементне співвідношення [110]. Згодом, у міру твердіння бетону, акумульована волога повертається цементному каменю і забезпечує подальший розвиток процесу гідратації цементу. Крім того, самовакуумування призводить до ліквідації скупчень вологи під зернами крупного заповнювача і запобігає утворенню седиментаційних порожнин. Разом водою в пори і капіляри заповнювача вноситься цемент, при гідратації якого відбувається зростання кристалічних з'єднань основної маси цементного каменю в тіло заповнювача. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню міцності як контакту заповнювача з цементним каменем, так і самого заповнювача.

4.2 Довготривалі експериментальні дослідження корозійної стійкості бетону на карбонатних заповнювачах

4.2.1 Методика експериментальних досліджень

Довготривалі експериментальні дослідження бетонних зразків для оцінки впливу карбонатних заповнювачів на міцність та довговічність бетону проводилися в лабораторії ДВНЗ «ПДАБА», розпочинаючи з 1990 р. Експеримент було розпочато Ф.А. Ракутумаву [83], наступні проміжні дані через 20 років отримано С.Є. Шехоркіною [111]

Як вже було зазначено в розділах 1 та 2, взаємодія між рідким агресивним середовищем і активними компонентами цементу є складним процесом. В реальних умовах під час сульфатної корозії характеристики бетону нерівномірно змінюються по глибині перерізу, оскільки зв'язані сульфат-іони нерівномірно розподіляються по глибині фронту взаємодії між агресивним середовищем і бетоном.

В зв'язку з вищенаведеними особливостями корозійного процесу у випадку, коли досліджуваний зразок має масивний поперечний переріз, отримані в результаті випробувань характеристики міцності можуть некоректно відобразити взаємозв'язок між кількісними параметрами сульфатної корозії та зміною властивостей бетону [83, 111].

Для мінімізації впливу даного фактора на результати дослідження характеристик бетону в умовах сульфатної корозії використовуються порожнисті зразки циліндричної форми з товщиною стінки 10..20 мм. Таким чином забезпечується двосторонній контакт з агресивним розчином, а стінка зразка завдяки малій товщині може розглядатися як елементарний шар бетону. При цьому вважається, що зв'язані сульфат-іони розподіляються рівномірно по поперечному перерізу.

Геометричні параметри зразків, прийняті для дослідження, приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Геометричні параметри зразків-циліндрів для дослідження

Висота, мм	Діаметр основи, мм	Товщина стінки, мм
50	50	10

Зразки виготовлялися з бетонної суміші на низькоалюмінатному цементі з хіміко-мінералогічним складом, приведеним в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Хіміко-мінералогічний склад цементу

SiO ₂	21,76	CaO	65,78	CaO _b	0,85	C ₂ S	13
Al ₂ O ₃	4,54	MgO	4,15	FeO	-	C ₃ A	7,1
Fe ₂ O ₃	2,8	SO ₃	0,32	C ₃ S	65	C ₄ AF	8,8

Як дрібний заповнювач в бетонних сумішах застосовувалися кварцовий і карбонатний пісок, а також пилоподібні частки, отримані шляхом подрібнення карбонатного піску. Основні характеристики кварцового піску приведені в табл. 4.3. Гранулометричний склад кварцового піску наведено в табл. 4.4.

Характеристики та гранулометричний склад карбонатного піску приведені в табл. 4.5 та 4.6.

Таблиця 4.3 – Характеристики кварцового піску

Модуль крупності	Насипна густина	Густина зерен
1,83	1600 кг/м ³	2650 кг/м ³

Таблиця 4.4 – Гранулометричний склад кварцового піску

№ сита, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	Нижній піддон
Залишок на ситі, %	3,1	8,5	22	56,7	92,7	100

Таблиця 4.5 - Характеристики карбонатного піску

Модуль крупності	Насипна густина	Густина зерен	Пустотність	Водопотреба	Вміст часток	
					глинистих	органічних
2,1	1412 кг/м ³	2730 кг/м ³	48 %	5,7 %	0,95 %	норма

Таблиця 4.6 – Гранулометричний склад карбонатного піску

№ сита, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	піддон
Залишок на ситі, %	5,5	6,0	14	32,0	59	93	100

Бетонні суміші виготовлялися в бетонозмішувачі, з наступним ущільненням на стаціонарному вібростолі. Твердіння бетону зразків проводилося із застосуванням теплової обробки за етапами:

- 1) попереднє витримування протягом 3 годин;
- 2) нагрів до температури 85 ° С протягом 3 годин;
- 3) ізотермічний прогрівання протягом 6 годин;
- 4) охолодження при закритій кришці протягом 8 годин.

Для дослідження впливу карбонатних наповнювачів на довговічність бетону в агресивних сульфатних розчинах в бетонних сумішах варіювався вміст карбонатного піску і пилоподібних частинок. Окремо було виготовлено серію зразків для порівняльного аналізу, які витримувались у воді. Загалом для виконання досліджень було виконано 8 типів серій зразків.

Склад та характеристики бетонних сумішей представлені в табл. 4.7.

Зразки серій «Д» витримувались в розчині сульфату натрію з концентрацією 5%. Протягом всього періоду випробувань проводився систематичний моніторинг концентрацій сульфатних розчинів для підтримання концентрації сульфат-іонів в межах допустимого відхилення, яке було прийнято не більше 5%. У випадку перевищення відхилення концентрації виконувалась повна заміна розчину.

Зразки серії «М» витримувались у воді та на відміну від зразків, що витримувались у сульфатному розчині, були виготовлені у формі кубів з розміром сторони 30 мм.

Загальний вигляд зразків приведено на рис. 4.1, 4.2.

Таблиця 4.7 – Склад і характеристики бетонних сумішей для виготовлення зразків

№ серії	Найменування серії	Вміст піску, %			Співвідношення Ц:П:В/Ц
		кварцового	карбонатного	пилоподібних часток	
1	2	3	4	5	6
1	Д-50-КВ-88-ПЧ-12	88	-	12	1:2:0.50
2	Д-50-КВ-93-ПЧ-07	93	-	7	1:2:0.50
3	Д-50-КВ-98-ПЧ-02	98	-	2	1:2:0.50
4	Д-50-КВ-100-ПЧ-0	100	-	-	1:2:0.50
5	Д-50-КА-93-ПЧ-07	-	93	7	1:2:0.50
6	Д-50-КА-88-ПЧ-12	-	88	12	1:2:0.50
7	М-55-КА-100-КВ-0	-	100	-	1:2:0.55
8	М-50-КА-100-КВ-0	-	100	-	1:2:0.50



Рисунок 4.1 - Загальний вигляд зразків серії «Д» для експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону



Рисунок 4.2 - Загальний вигляд зразків серії «М» для експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону

4.2.2 Результати довготривалих експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону на карбонатних заповнювачах

В продовження довготривалого експерименту через 30 років експонування в сульфатному розчині Na_2SO_4 з концентрацією 5% та воді було виконано візуальне обстеження та випробування на стиск.

Загальний вигляд зразків після 30 років дослідження довговічності в сульфатному розчині приведено на рис. 4.3 – 4.8.

В свою чергу вигляд зразків, що витримувались у воді, приведено на рис. 4.9, 4.10.



Рисунок 4.3 – Загальний вигляд зразків серії Д-50-КВ-88-ПЧ-12 після 30 років експозиції в 5 % розчині Na_2SO_4



Рисунок 4.4 – Загальний вигляд зразків серії Д-50-КВ-93-ПЧ-07 після 30 років експозиції в 5 % розчині Na_2SO_4



Рисунок 4.5 – Загальний вигляд зразків серії Д-50-КВ-98-ПЧ-02 після 30 років експозиції в 5 % розчині Na_2SO_4



Рисунок 4.6 – Загальний вигляд зразків серії Д-50-КВ-100-ПЧ-0 після 30 років експозиції в 5 % розчині Na_2SO_4



Рисунок 4.7 – Загальний вигляд зразків серії Д-50-КА-93-ПЧ-07 після 30 років експозиції в 5 % розчині Na_2SO_4



Рисунок 4.8 – Загальний вигляд зразків серії Д-50-КА-88-ПЧ-12 після 30 років експозиції в 5 % розчині Na_2SO_4



Рисунок 4.9 – Загальний вигляд зразків серії М-50-КА-100-КВ-0 після 30 років експозиції в воді



Рисунок 4.10 – Загальний вигляд зразків серії М-50-КА-100-КВ-0 після 30 років експозиції в воді

Як видно з рис. 4.3 – 4.8, зразки на карбонатних заповнювачах майже неушкоджені та характеризуються наявністю незначних волосяних тріщин на поверхні. З іншого боку, зразки виготовлені з використанням кварцового піску мають глибокі проникаючі тріщини шириною, що перевищує 1,5..2 мм. Такі результати свідчать про формування кількості новоутворень, що зумовила виникнення внутрішніх напружень, які перевищили міцність бетону на розтяг. Деякі зі зразків з 100% вмістом кварцового піску мають наскрізні тріщини на всю висоту зразка і фактично зруйновані. Зразки, що витримувались у воді, не мають істотних ушкоджень.

Також було виконано заміри фактичних розмірів зразків для оцінки зміни об'єму в результаті накопичення продуктів корозії. Початковий об'єм зразків складав $12,56 \text{ см}^2$, об'єм – 62,8 см³. Отримані дані після 30 років експозиції в 5 % розчині Na₂SO₄ приведені в табл. 4.8.

Як видно з отриманих даних, найбільше збільшення об'єму спостерігається у зразках серій Д-50-КВ-88-ПЧ-12 з вмістом кварцового піску 88 %, яке становить 17,64..17,83 %, Д-50-КВ-93-ПЧ-07 з вмістом кварцового піску 93 % - 16,33..17,34 %, а також Д-50-КВ-100-ПЧ-0 зі 100 % вмістом кварцового піску – 15,83..18,09 %.

Зразки на карбонатному піску характеризуються значно меншим та приблизно однаковим збільшенням об'єму. Зокрема в серії Д-50-КА-93-ПЧ-07 з вмістом карбонатного піску 93 % збільшення становило 6,41..9,11 % та в серії Д-50-КА-88-ПЧ-12 з вмістом карбонатного піску 88 % збільшення становило 7,63..9,17 %.

Для оцінки ефективності застосування карбонатних наповнювачів для підвищення довговічності бетону в умовах агресивного сульфатного середовища на міцність бетону, схильного до впливу, було виконано дослідження міцності зразків шляхом випробування на стиск. Для порівняння приведені дані, отримані в роботах [83, 111]. Сукупність результатів визначення міцності приведено в табл. 4.9-4.14.

Таблиця 4.8 – Геометричні параметри зразків після 30 років експозиції в 5% розчині Na_2SO_4

Найменування серії	Висота зразка, мм	Товщина стінки, мм	Діаметр зразка, мм		Площа перерізу, см^2	Об'єм зразка, МПа	% зміни об'єму
			верх	низ			
Д-50-КВ-88-ПЧ-12	51,5	11,5	54	51	14,81	76,25	+17,64
	53	11	52	53,5	14,42	76,43	+17,83
Д-50-КВ-93-ПЧ-07	53	11	54	51	14,33	75,97	+17,34
	53	11	53	51	14,16	75,06	+16,33
Д-50-КВ-98-ПЧ-02	51	10,8	51	51	13,63	69,53	+9,67
	51	10,8	51	51	13,63	69,53	+9,67
Д-50-КВ-100-ПЧ-0	52,5	11,1	52	54	14,60	76,67	+18,09
	52	11,2	53	51	14,35	74,61	+15,83
Д-50-КА-93-ПЧ-07	50,5	10,7	50	50,5	13,29	67,10	+6,41
	51	10,8	51	50,5	13,55	69,09	+9,11
Д-50-КА-88-ПЧ-12	51	11	50,5	50	13,56	69,14	+9,17
	50,5	10,8	50,5	50,5	13,46	67,99	+7,63

Таблиця 4.9 – Зміна міцності зразків серії Д-50-КВ-88-ПЧ-12 протягом 30 років експозиції в 5% розчині Na_2SO_4

Міцність зразка, МПа			
початкова	180 діб	20 років	30 років
20,06	43,86	5,92	3,9
28,72	36,06	3,07	2,25
22,64	40,98	-	-

Таблиця 4.10 – Зміна міцності зразків серії Д-50-КВ-93-ПЧ-07 протягом 30 років експозиції в 5% розчині Na_2SO_4

Міцність зразка, МПа			
початкова	180 діб	20 років	30 років
16,2	26,47	5,23	3,45
35,33	34,61	5,14	3,31
29,38	25,94	-	-

Таблиця 4.11 – Зміна міцності зразків серії Д-50-КВ-98-ПЧ-02 протягом 30 років експозиції в 5% розчині Na_2SO_4

Міцність зразка, МПа			
початкова	180 діб	20 років	30 років
21,08	24,11	7,18	4,37
26,36	22,37	6,79	4,72
10,96	35,55	-	-

Таблиця 4.12 – Зміна міцності зразків серії Д-50-КВ-100-ПЧ-0 протягом 30 років експозиції в 5% розчині Na_2SO_4

Міцність зразка, МПа			
початкова	180 діб	20 років	30 років
23,86	17,97	4,53	2,75
25,5	24,39	6,28	3,9
18,67	15,74	-	-

Таблиця 4.13 – Зміна міцності зразків серії Д-50-КА-93-ПЧ-07 протягом 30 років експозиції в 5% розчині Na_2SO_4

Міцність зразка, МПа			
початкова	180 діб	20 років	30 років
29,77	35,47	16,57	12,34
27,96	38,62	15,3	11,87
26,85	41,2	-	-

Таблиця 4.14 – Зміна міцності зразків серії Д-50-КА-88-ПЧ-12 протягом 30 років експозиції в 5% розчині Na_2SO_4

Міцність зразка, МПа			
початкова	180 діб	20 років	30 років
23,21	45,36	11,09	7,84
34,62	38,37	14,12	10,54
30,1	43,7	-	-

Як видно з отриманих протягом 30 років агресивного впливу сульфатного розчину суттєво знизилась міцність зразків усіх серій.

Так в зразках на кварцовому піску зниження міцності становило:

- для серії Д-50-КВ-88-ПЧ-12 з 20,06..28,72 МПа до 2,25..3,9 МПа;
- для серії Д-50-КВ-93-ПЧ-07 з 16,2..35,33 МПа до 3,31..3,45 МПа;
- для серії Д-50-КВ-98-ПЧ-02 з 10,96..26,36 МПа до 4,37..4,72 МПа;
- для серії Д-50-КВ-100-ПЧ-0 з 18,67..25,5 МПа до 2,75..3,9 МПа.

Що стосується зразків на карбонатному піску зниження міцності становило:

- для серії Д-50-КА-93-ПЧ-07 з 26,85..29,77 МПа до 11,87..12,34 МПа;
- для серії Д-50-КА-88-ПЧ-12 з 23,21..30,1 МПа до 7,84..10,54 МПа.

Таблиця 4.15 – Зміна міцності зразків серії М-50-КА-100-КВ-0 протягом 30 років витримки у воді

Міцність зразка, МПа		
початкова	1 рік	30 років
20,21	45,85	42,9
22,47	40,52	40,3
23,65	46,99	

Таблиця 4.16 – Зміна міцності зразків серії М-55-КА-100-КВ-0 протягом 30 років витримки у воді

Міцність зразка, МПа		
початкова	1 рік	30 років
19,25	36,32	35,6
24,39	44,31	43,7
23,37	29,7	-

Порівняльні дані щодо зниження міцності випробуваних зразків приведені в табл. 4.17.

За результатами проведених випробувань, а також з використанням даних, отриманих на попередніх етапах дослідження, що наведені в роботах [83, 111], були отримані графіки зміни міцності бетону при експозиції в 5 % розчині Na_2SO_4 та у воді протягом 30 років.

Отримані графіки приведені на рис. 4.11.

Таблиця 4.17 - Порівняльні дані щодо зниження міцності випробуваних зразків

Найменування серії	Середнє значення міцності зразка, МПа		% зниження міцності
	початкова	через 30 років	
Д-50-КВ-88-ПЧ-12	21,35	3,07	85,6
Д-50-КВ-93-ПЧ-07	26,9	3,38	87,4
Д-50-КВ-98-ПЧ-02	23,72	4,54	80,9
Д-50-КВ-100-ПЧ-0	24,68	3,32	86,5
Д-50-КА-93-ПЧ-07	28,2	12,1	57,1
Д-50-КА-88-ПЧ-12	32,36	9,2	71,5

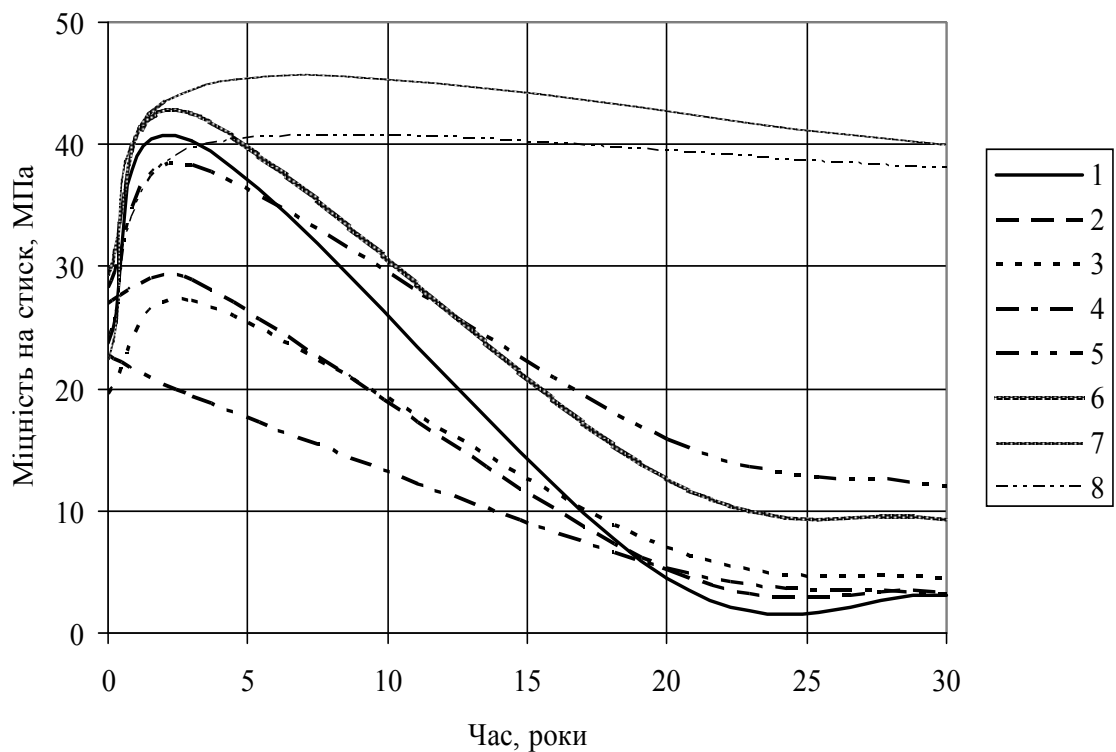


Рисунок 4.11 – Графіки зміни міцності бетону при експозиції в 5% розчині

Na_2SO_4 та у воді протягом 30 років для серій:

- 1 - Д-50-КВ-88-ПЧ-12, 2 - Д-50-КВ-93-ПЧ-07, 3 - Д-50-КВ-98-ПЧ-02,
 4 - Д-50-КВ-100-ПЧ-0, 5 - Д-50-КА-93-ПЧ-07, 6 - Д-50-КА-88-ПЧ-12,
 7 - М-50-КА-100-КВ-0; 8 - М-55-КА-100-КВ-0

За даними рис. 4.11 можна зробити висновок, що після довготривалої (30 років) експозиції в 5 % розчині сульфату натрію зразки серій 5 і 6, що містять 88 % і 93 % карбонатного піску, відповідно, характеризуються більш високою міцністю. При цьому міцність на стиск зразків на карбонатному піску в 1.7 - 3.4 разів вище, ніж зразків на кварцовому піску. Зразки 5 серії з вмістом карбонатного піску 93 % мають найбільшу міцність. Міцність зразків 1 - 4 серій на кварцовому піску після 30 років випробувань приблизно однакова. Зразки, що весь час витримувались у воді, характеризуються незначним зниженням міцності.

4.3 Оцінка довговічності бетону на карбонатних заповнювачах з урахуванням температури середовища

Результати довготривалих експериментальних досліджень довговічності бетону підтвердили позитивний вплив застосування карбонатних заповнювачів на міцність та довговічність бетону при сульфатній корозії. Тим не менше, вищевикладений експеримент проводився в умовах нормальних температур (18-22 °C) і не враховував вплив інших можливих значень на довговічність бетону.

Для дослідження довговічності бетону на карбонатних заповнювачах з урахування температури середовища було проведено чисельний експеримент з використанням методики, що запропонована в розділі 2.

При взаємодії карбонатного піску з цементом, порівняно з кварцовим, змінюється кількість утворених гідроалюмінатів. Для врахування особливостей фізико-хімічних процесів використовується залежність, запропонована в роботі [7]:

$$C_3AH_6 = \alpha_g (1.4[n \cdot C_3A - 0.03 - 0.027kS] + 0.778n \cdot C_4AF), \quad (4.2)$$

де C_3AH_6 – доля гідроалюмінатів;

C_3A – трикальцієвий алюмінат;

C_4AF – чоторикальцієвий алюмоферит;

n – відносна кількість речовини;

αg – ступінь гідратації цементу;

k – кількість карбонатного заповнювача по відношенню до піску;

S – витрата піску.

В якості варійованих параметрів бетону були прийняті: марка цементу і його хіміко-мінералогічний склад; клас міцності і склад бетону конструкції; вид заповнювача (кварцовий або карбонатний пісок). Концентрації агресивних сульфатних розчинів приймалися рівними 15 г/л, 30 г/л та 50 г/л в перерахунку на SO_4^{2-} . Для аналізу були прийняті бетонні суміші класу міцності C15/20, C20/25 та C25/30 на портландцементі марки ПЦ II/A-III-400. Вид цементу та його хіміко-мінералогічний склад наведені в табл. 4.18. Характеристики бетонних сумішей приведені в табл. 4.19.

Таблиця 4.18 – Хіміко-мінералогічний склад цементу

Тип цементу	Характеристика, %			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
ПЦ II/A-III-400	60,14	16,76	6,99	12,23

Таблиця 4.19 – Характеристики бетонних сумішей

Клас бетону	Витрата цементу, кг/м ³	Склад бетону			В/Ц
		цемент	пісок	щебінь	
C15/20	225	1	2,8	4,8	0,65
C20/25	305	1	2,1	3,9	0,6
C25/30	335	1	1,75	3,48	0,55

В результаті моделювання були отримані дані щодо глибини ушкодження (розміщення) бетону внаслідок сульфатної корозії протягом 100 років впливу агресивного середовища при температурах 15 та 25 °С, що дозволяє також проаналізувати вплив температури на інтенсивність корозійного процесу.

В табл. 4.20, 4.21 приведені результати моделювання для бетонів на кварцовому та карбонатному заповнювачі при концентрації $SO_4^{2-}=15$ г/л при температурі 15 °С.

Таблиця 4.20 – Глибина розміщення бетону на кварцовому заповнювачі при концентрації $SO_4^{2-}=15$ г/л при температурі 15°С

Термін впливу, роки	Глибина розміщення бетону класу		
	C15/20	C20/25	C25/30
10	0,75	0,6	0,2
25	1,6	1,4	1
50	2,25	2,3	1,8
100	2,75	2,55	2,4

Таблиця 4.21 – Глибина розміщення бетону на карбонатному заповнювачі при концентрації $SO_4^{2-}=15$ г/л при температурі 15°С

Термін впливу, роки	Глибина розміщення бетону класу		
	C15/20	C20/25	C25/30
10	0,65	0,35	0
25	1	0,85	0,2
50	1,8	1,65	1,35
100	2,1	1,9	1,75

Як видно з табл. 4.20 та 4.21, застосування карбонатного заповнювача дозволяє знизити прогнозне значення глибини розміщення бетону внаслідок

сульфатної корозії через 100 років впливу при температурі 15 °С на 23 % для бетону класу С15/20, на 27 % для бетону класу С20/25 та С25/30.

В табл. 4.22, 4.23 приведені результати моделювання для бетонів на кварцовому та карбонатному заповнювачі при концентрації $SO_4^{2-} = 15$ г/л при температурі 25 °С.

Таблиця 4.22 – Глибина розміщення бетону на кварцовому заповнювачі при концентрації $SO_4^{2-} = 15$ г/л при температурі 25°С

Термін впливу, роки	Глибина розміщення бетону класу		
	С15/20	С20/25	С25/30
10	0,85	0,6	0,4
25	1,7	1,6	1,18
50	2,35	2,4	1,95
100	2,85	2,7	2,55

Таблиця 4.23 – Глибина розміщення бетону на карбонатному заповнювачі при концентрації $SO_4^{2-} = 15$ г/л при температурі 25°С

Термін впливу, роки	Глибина розміщення бетону класу		
	С15/20	С20/25	С25/30
10	0,69	0,49	0,32
25	1,28	1,20	0,89
50	2,04	1,8	1,56
100	2,22	2,03	1,91

З табл. 4.22, 4.23 видно, що при температурі 25°С зменшення прогнозованої глибини розміщення бетону за рахунок застосування карбонатного заповнювача через 100 років впливу сульфатного розчину $SO_4^{2-} = 15$ г/л становить - на 22 % для бетону класу С15/20, на 24.8 % для бетону класу С20/25 та 25 % для бетону класу С25/30.

Отримані дані для бетонів на кварцовому та карбонатному заповнювачі при концентраціях розчину $SO_4^{2-} = 30$ та 50 г/л та температурі 15 та 25 °C приведені у вигляді графіків на рис. 4.12 – 4.15.

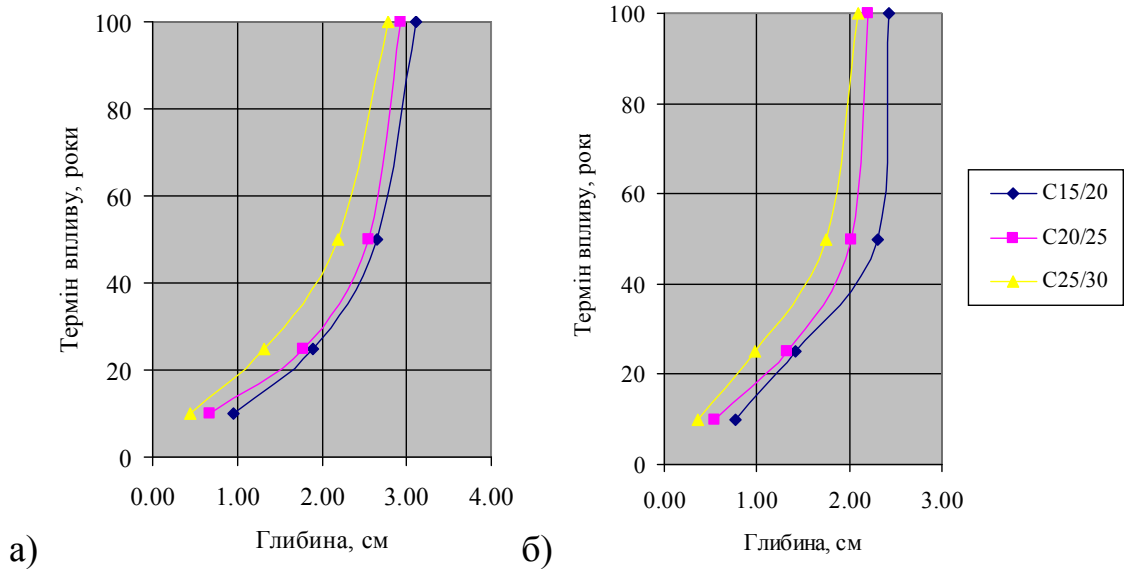


Рисунок 4.12 – Глибина розміщення бетону при концентрації $SO_4^{2-} = 30$ г/л при температурі 15 °C: а) на кварцовому заповнювачі; б) на карбонатному заповнювачі

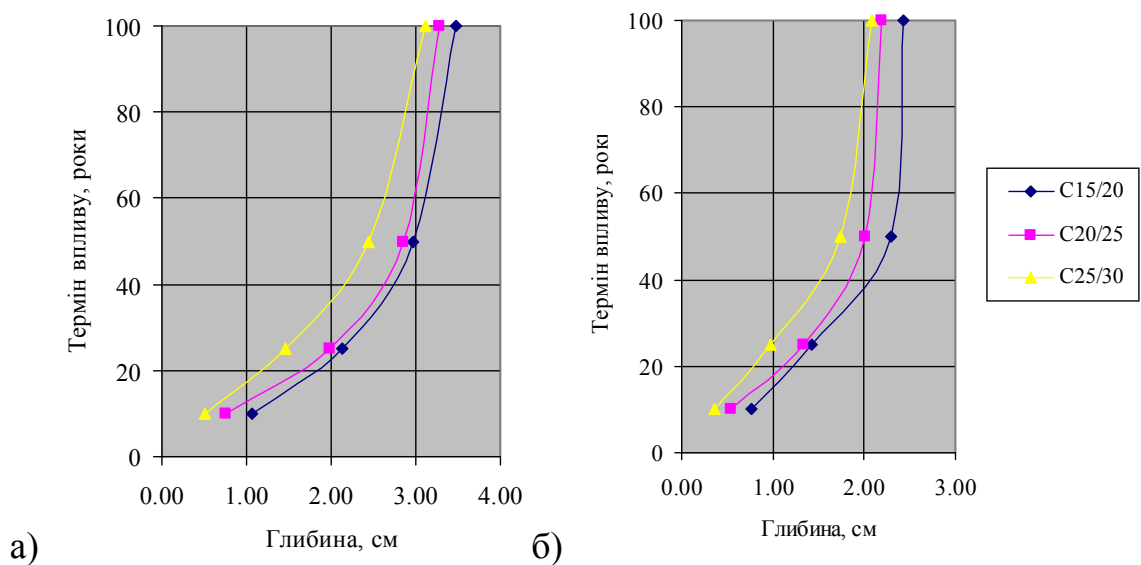


Рисунок 4.13 – Глибина розміщення бетону при концентрації $SO_4^{2-} = 30$ г/л при температурі 25 °C: а) на кварцовому заповнювачі; б) на карбонатному заповнювачі

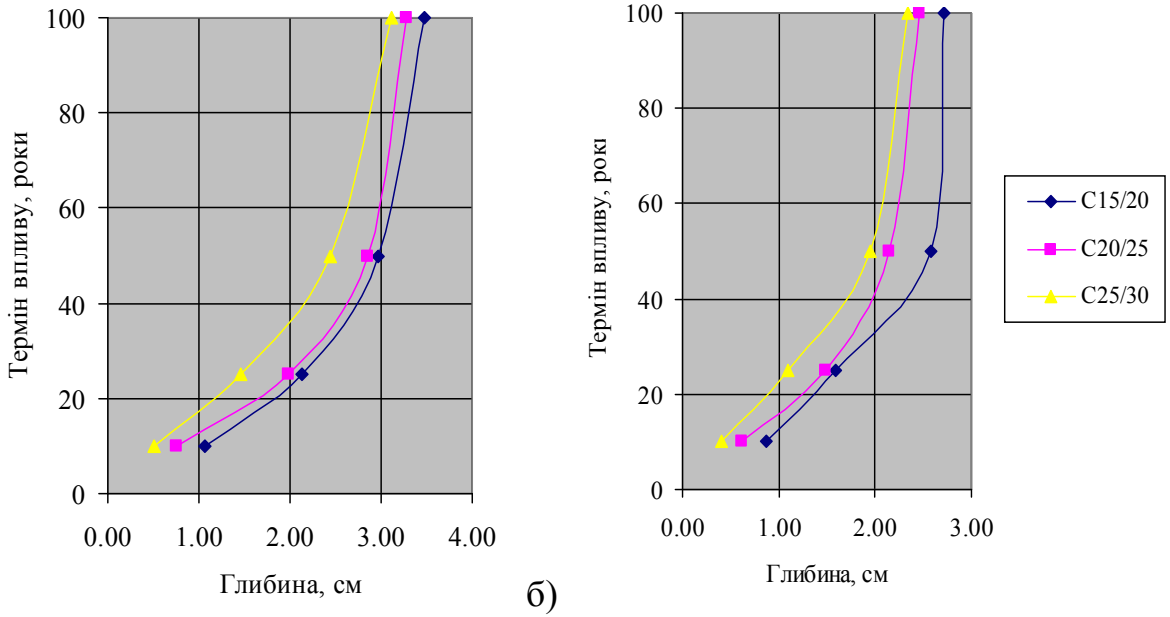


Рисунок 4.14 – Глибина розміцнення бетону при концентрації сульфат – іонів 50 г/л при температурі 15 °С: а) на кварцовому заповнювачі; б) на карбонатному заповнювачі

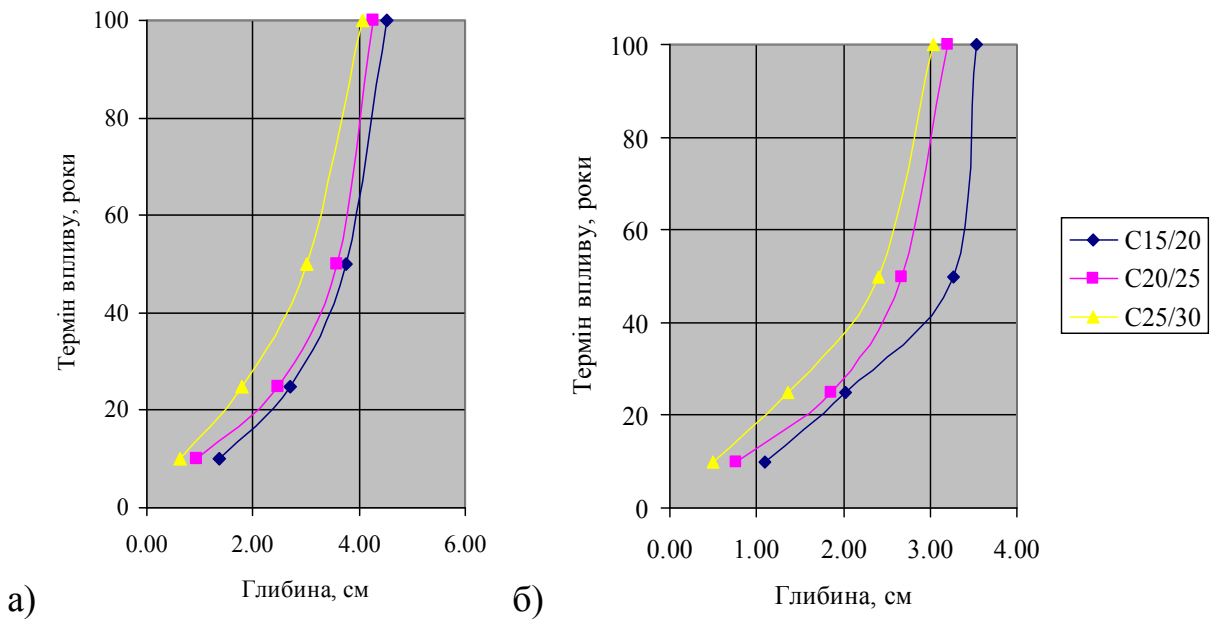


Рисунок 4.15 – Глибина розміцнення бетону при концентрації $SO_4^{2-} = 50$ г/л при температурі 25 °С: а) на кварцовому заповнювачі; б) на карбонатному заповнювачі

Отримані теоретичні дані підтверджують вплив температури агресивного середовища на швидкість розміцнення бетону захисного шару та позитивний вплив карбонатних заповнювачів на довговічність бетону в умовах сульфатної корозії.

Для розглянутих параметрів бетонних сумішей при температурі 25 °С теоретична глибина розміцнення бетону становить 3,1 – 3,5 см при концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л та 4,0 – 4,5 см при концентрації $SO_4^{2-}=50$ г/л, тоді як при температурі 15 °С, відповідно, 2,8 – 3,1 см та 3,6 – 4,0 см.

Використання в якості заповнювача карбонатного піску веде до зменшення прогнозованої глибини ушкодження до 2,3 – 2,7 см при температурі 25 °С та концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л та 3,0 – 3,5 см при концентрації $SO_4^{2-}=50$ г/л; відповідно, при температурі 15 °С до 2,1 – 2,4 см та 2,7 – 3,1 см.

Таким чином, шляхом підбору конструктивних та технологічних параметрів конструкції, тобто товщини захисного шару та складу бетону, а також враховуючи реальні температури експлуатації та характеристики агресивного сульфатного середовища можливо проектувати конструкції із заданим терміном експлуатації.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Сформульовано теоретичні передумови впливу заповнювачів з карбонатних порід на підвищення сульфатостійкості бетону за рахунок особливостей фізико-хімічної взаємодії з цементом.

2. В рамках довготривалих експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону на карбонатних заповнювачах проведено візуальне обстеження та випробування на стиск зразків через 30 років експонування в сульфатному розчині Na_2SO_4 з концентрацією 5 % та воді. Виконано оцінку зміни об'єму в результаті накопичення продуктів корозії.

Порівняно зі зразками на кварцовому піску, зразки на карбонатному піску характеризуються значно меншим збільшенням об'єму. Через 30 років випробувань міцність на стиск зразків на карбонатному піску в 1,7 – 3,4 разів вище, ніж зразків на кварцовому піску.

3. В результаті чисельного експерименту отримані дані щодо довговічності бетону на карбонатних заповнювачах з урахування температури середовища. Встановлено, що використання в якості заповнювача карбонатного піску веде до зменшення прогнозованої глибини ушкодження до 2,3 – 2,7 см при температурі 25 °С та концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л та 3,0 – 3,5 см при концентрації $SO_4^{2-}=50$ г/л; відповідно, при температурі 15 °С до 2,1 – 2,4 см та 2,7 – 3,1 см.

Результати, наведені в розділі, опубліковані в таких роботах автора [112-114].

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ СУЛЬФАТНОЇ КОРОЗІЇ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ СЕРЕДОВИЩА

5.1 Забезпечення довговічності бетону в умовах сульфатної корозії

Технічні рішення будівельних конструкцій, що експлуатуються в агресивних середовищах будь-яких типів, повинні розроблятися з урахуванням попередження або обмеження наслідків, а також зменшення корозійних ушкоджень.

З цією метою згідно чинних норм ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [1] основними видами захисту бетону і залізобетону від корозії є первинний та вторинний захист.

Заходи первинного захисту можуть включати розробку стійких до впливу агресивного середовища складів бетону, зменшення проникності бетону та застосування спеціальних добавок. Окрім цього, первинний захист виконується шляхом розробки додаткових конструктивних вимог, які як правило, стосуються товщини захисного шару.

Вторинний захист застосовується у випадках, якщо захист від корозії не може бути забезпечений заходами первинного захисту.

Вторинний антикорозійний захист проектується на певний термін та згодом потребує відновлення, що є можливим не для всіх конструкцій.

При розробці заходів із забезпечення необхідної довговічності в якості вихідних даних норми [1] визначають:

- параметри агресивного середовища, а саме його вид, періодичність та тривалість впливу, концентрацію агресивних речовин та її можливі зміни;

- характеристику експлуатаційного середовища, наприклад, кліматичні умови, температурний або вологісний режим;
- результати інженерно-геологічних вишукувань, зокрема, дані щодо ступеню агресивності ґрунтів та ґрунтових вод; тощо.

Залежно від характеристик та інтенсивності впливу на бетонні та залізобетонні конструкції середовища експлуатації класифікуються як неагресивні, слабоагресивні, середньоагресивні і сильноагресивні.

Класи та характеристики середовищ відповідно до норми [1] стосовно сульфатної корозії систематизовані в табл. 5.1 - 5.3. Параметри агресивності приводяться для бетону марки за водонепроникністю W4.

Таблиця 5.1 – Класифікація середовищ експлуатації

Дія морської води		Хімічна корозія в ґрунту, ґрунтових водах	
Індекс середовища	Середовище експлуатації	Індекс середовища	Середовище експлуатації
XS1	Вплив солей, але без прямого контакту з морською водою	XA1	Незначна присутність агресивних агентів
XS2	Постійне перебування у воді	XA2	Помірна присутність агресивних агентів
XS3	Приливна зона, дія солоних бризок, хвиль	XA3	Сильна присутність агресивних агентів

Примітка. XS1, XA1 – слабоагресивне середовище; XS2, XA2 – середньоагресивне середовище; XS3, XA3 – сильноагресивне середовище

Таблиця 5.2 – Параметри агресивних середовищ

Агресивний агент	Індекс середовища		
	ХА1	ХА2	ХА3
Вміст сульфатів в перерахунку на SO_4^{2-} , мг/дм ³ у воді	≥ 200	> 600	> 3000
	≤ 600	≤ 3000	≤ 6000
Вміст сульфатів у перерахунку на SO_4^{2-} , мг/дм ³ у ґрунті	≥ 2000	> 3000	> 12000
	≤ 3000	≤ 12000	≤ 24000

Таблиця 5.3 – Ступінь агресивності ґрунтів

Зона вологості (згідно з [--])	Показник агресивності, мг на 1 кг ґрунту			Ступінь агресивного впливу ґрунту на бетон
	сульфатів у перерахунку на SO_4^{2-} для бетонів на			
	портланд-цементі згідно з [--]	портландцементі згідно з [--] з вмістом $\text{C}_3\text{S} \leq 65\%$, $\text{C}_3\text{A} \leq 7\%$, $(\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}) \leq 22\%$, шлакопортландцементі	сульфато-стійких цементів згідно з [--]	
Суха	500 - 1000	3000 - 4000	6000 - 12000	ХА1
	1000 - 1500	4000 - 5000	12000 - 15000	ХА2
	Понад 1500	Понад 5000	Понад 15000	ХА3
Нормальна та волога	250 - 500	1500 - 3000	3000 - 6000	ХА1
	500 - 1000	» 3000 - 4000	6000 - 8000	ХА2
	Понад 1000	Понад 4000	Понад 8000	ХА3

Від ступеня агресивності залежать мінімальні вимоги до конструктивно-технологічних параметрів конструкції, які у випадку

сульфатного середовища включають види та характеристики компонентів бетонної суміші, допустиме водо цементне співвідношення, мінімальний вміст цементу та клас бетону за міцністю на стиск. Деякі вимоги до бетонів, виготовлених на цементах типу ПЦ I марки не нижче М400 в умовах впливу сульфатного середовища приведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Вимоги до бетонів в умовах впливу сульфатного середовища

Вимоги до бетонів	Класи середовищ експлуатації					
	Морська вода			Хімічна корозія		
	Індекси середовищ експлуатації					
	XS1	XS2	XS3	XA1	XA2	XA3
Максимальне В/Ц	0,5	0,45	0,45	0,55	0,5	0,45
Мінімальний клас міцності	25/30	30/35	30/35	25/30	25/30	30/35
Мінімальна витрата цементу, кг/м ³	300	320	340	300	320	360
Інші вимоги				Сульфатостійкий цемент		

Мінімально допустима товщина захисного шару бетону залежить від ступню агресивності середовища. Вимоги до товщини захисного шару в умовах впливу сульфатного середовища приведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Вимоги до залізобетонних конструкцій в умовах впливу сульфатного середовища

Мінімально допустима товщина захисного шару бетону, мм		
Слабоагресивне середовище	Середньоагресивне середовище	Сильноагресивне середовище
20	20	25

Для залізобетонних конструкцій, влаштування вторинного захисту поверхні яких ускладнено (буронабивні палі, підпірні стіни, інші підземні або заглиблені конструкції), необхідно застосовувати первинний захист спеціальними видами цементу, заповнювачів, підбором складів бетону, введенням добавок, що підвищують стійкість бетону тощо.

Обґрунтування захисних заходів та вибору матеріалів для забезпечення довговічності бетону та залізобетону виконується шляхом техніко-економічного порівняння варіантів конструктивно-технологічних рішень з урахуванням прогнозованого терміну експлуатації та витрат на виконання антикорозійного захисту.

5.2. Техніко-економічна ефективність антикорозійного захисту залізобетонних конструкцій в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури середовища

Оцінку техніко-економічної ефективності антикорозійного захисту залізобетонних конструкцій в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури середовища було виконано на прикладі улаштування конструкцій пального фундаменту малоповерхової індивідуальної житлової будівлі.

На рис. 5.1, 5.2 показано фасад та план першого поверху малоповерхової індивідуальної житлової будівлі, прийнятої до аналізу.

В якості фундаментів будівлі прийняті залізобетонні буронабивні палі діаметром 350 мм довжиною 2.75 м. Паля виконується з важкого бетону класу С25/30 армується поздовжньою арматурою 4Ø12 А500С та поперечною Ø8 А240С з кроком 250 мм. Загальна кількість палей становить 42 шт.

Схема розташування палей приведена на рис. 5.3. Креслення буронабивної палі приведено на рис. 5.4



Рисунок 5.1 – Фасад малоповерхової індивідуальної житлової будівлі,
прийнятої до аналізу

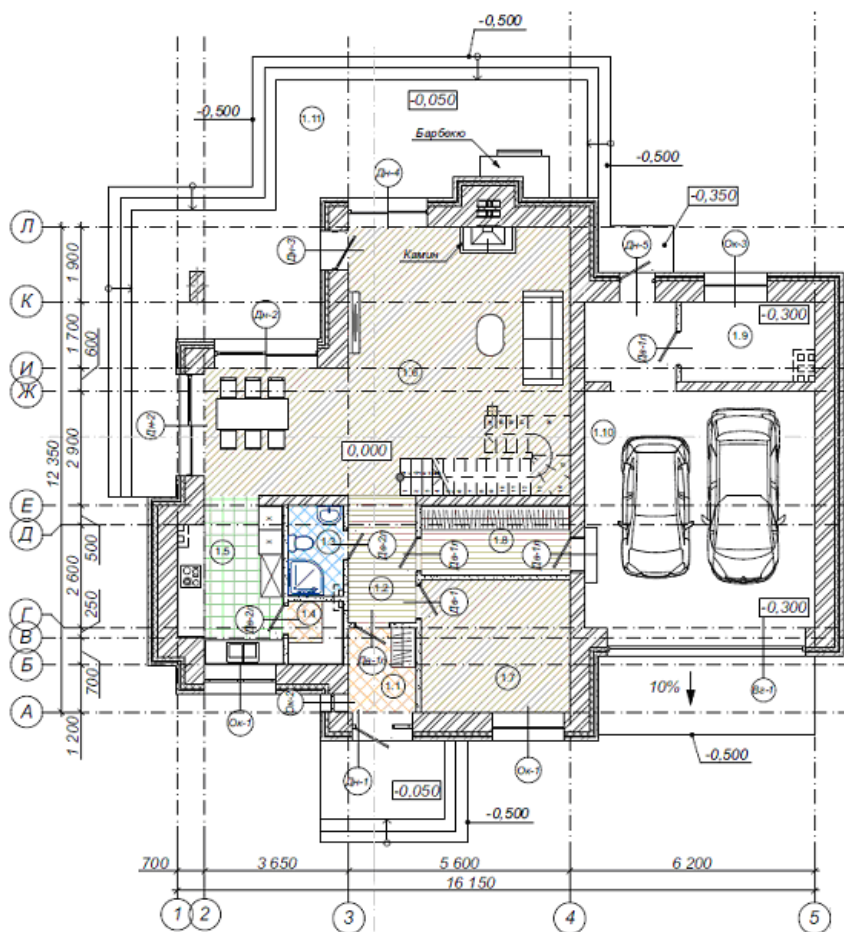


Рисунок 5.2 – План першого поверху малоповерхової індивідуальної
житлової будівлі, прийнятої до аналізу

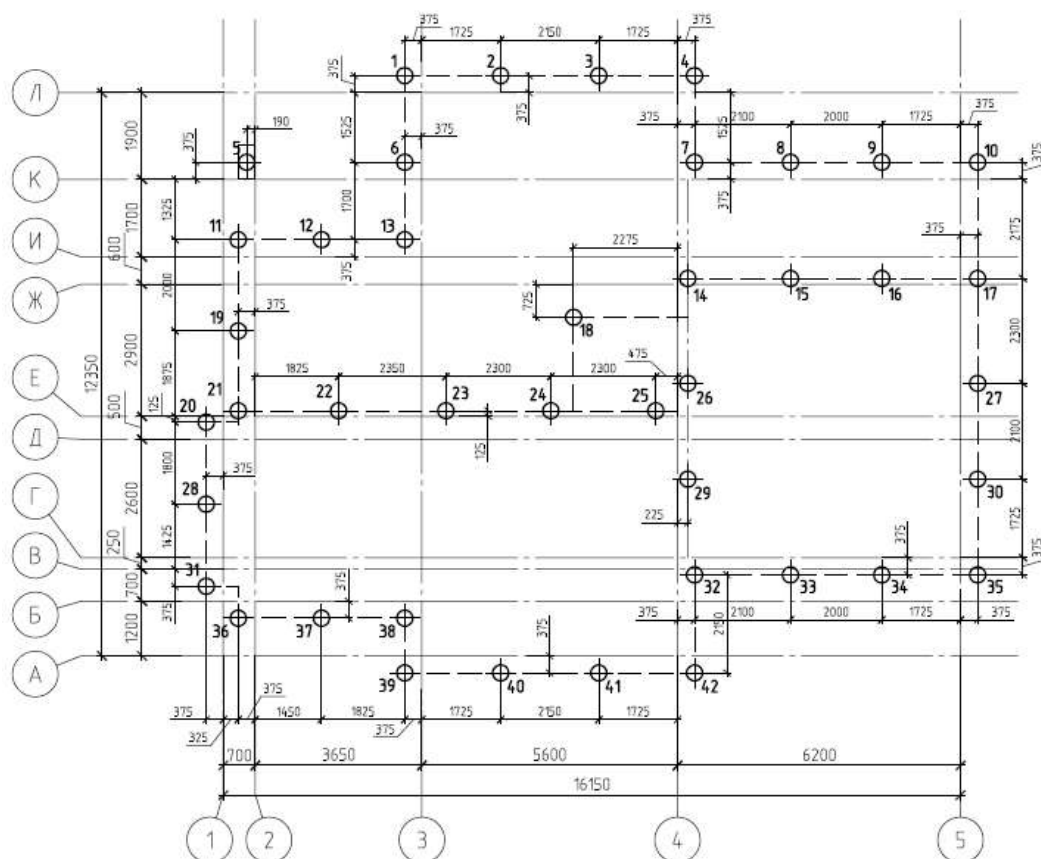


Рисунок 5.3 – Схема розташування буронабивних паль



Рисунок 5.4 – Креслення буронабивної палі

За вмістом сульфат-іонів ґрунт будівельного майданчика відноситься до середньоагресивного середовища з індексом ХА2. Концентрація сульфатів у перерахунку на SO_4^{2-} становить 60 г/л. Середньорічний розподіл температури по глибині ґрунту відповідає приведеному на рис. 3.8 (див. розділ 3). Розрахунковий термін експлуатації становить 100 років.

Для оцінки ефективності прогнозування довговічності та застосування первинного антикорозійного захисту приймаємо два варіанти мілкого наповнювача бетонної суміші, з якої виготовляються палі: 1) кварцовий пісок; 2) карбонатний пісок.

Вихідні дані для розрахунку вартості виготовлення набивних палей для улаштування фундаменту приведені в табл. 5.6. Вартість бетонних сумішей приведена в табл. 5.7.

Таблиця 5.6 – Середня вартість матеріалів

№ п/п	Матеріал	Од. вимірювання	Середня вартість, грн.
1	Щебінь	т	350
2	Пісок кварцевий	т	160
3	Пісок карбонатний	т	260
4	Портландцемент ПЦ II/A-III-400	т	1720

Таблиця 5.7 – Вартість бетонних сумішей

Вид цементу	Клас бетону	Вартість 1 м ³ , грн., бетонної суміші	
		на кварцовому піску	на карбонатному піску
ПЦ II/A-III-400	C25/30	1380	1492

Оскільки армування палі, а також вартість робіт по улаштуванню пального поля є незмінними параметрами, то вартість пального фундаменту буде визначатися вартістю бетону на його виготовлення.

За результатами прогнозування глибини ушкодження бетону в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури ґрунту необхідна товщина захисного шару становить:

- 1) для бетону на кварцовому піску – 35 мм;
- 2) для бетону на карбонатному піску – 25 мм.

Таким чином, для другого варіанту діаметр палі можна зменшити до 330 мм.

З урахуванням наведених особливостей були визначені техніко-економічні параметри улаштування фундаменту із залізобетонних палей, які приведені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Техніко-економічні параметри залізобетонних палей

Варіант	Витрата бетону, м ³		Вартість бетону, грн.	
	на од. шт.	загалом	на од. шт.	загалом
Бетон на кварцовому піску	0,27	11,34	372,6	15649,2
Бетон на карбонатному піску	0,23	9,66	343,1	14412,7

Як видно з отриманих результатів, застосування бетону на карбонатному піску для улаштування пального фундаменту розглянутого малоповерхового індивідуального житлового будинку дозволяє знизити вартість бетону на його виготовлення на 1236.5 грн., що становить 8%, порівняно з використанням бетону на кварцовому піску та підтверджує ефективність запропонованих заходів із забезпечення необхідної довговічності.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

1. На основі аналізу чинних норм щодо захисту залізобетонних конструкцій від корозії сформульовано вимоги до заходів по забезпеченню довговічності бетону в умовах сульфатної корозії залежно від характеристик агресивності середовища.

2. Виконано оцінку ефективності призначення первинного антикорозійного захисту шляхом прогнозування довговічності при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища. На прикладі улаштування пального фундаменту для малоповерхового індивідуального житлового будинку встановлено, що застосування бетону на карбонатному піску дозволяє знизити вартість бетону на його виготовлення на 1236,5 грн., що становить 8 %, порівняно з використанням бетону на кварцовому піску.

Результати, наведені в розділі, опубліковані в таких роботах автора [115-118].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі викладено науково-обґрунтовані результати досліджень, спрямованих на розв'язання актуальної задачі забезпечення довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури середовища.

1. На основі аналізу даних про сучасні методи моделювання процесу корозії та прогнозування довговічності бетону в умовах агресивного впливу сульфатних розчинів встановлено, що існуючі залежності не враховують вплив температури експлуатаційного середовища на кінетику корозійного процесу.

2. З використанням відомих досліджень та відомостей про механізм корозії бетону в рідких середовищах було запропоновано залежності, що описують кінетику процесу, та розроблено алгоритм прогнозування зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища. В результаті чисельного експерименту встановлено вплив температури на інтенсивність корозії та отримані дані щодо розподілу концентрацій взаємодіючих речовин (сульфат-іонів, іонів кальцію, гідроалюмінату кальцію та зв'язаних сульфат-іонів) по глибині бетону від його зовнішньої поверхні. Виконано оцінювання впливу міцності бетону і товщини захисного шару на довговічність залізобетону з урахуванням корозії арматури. У деякому інтервалі величин захисних шарів порівняно невелика зміна товщини захисного шару призводить до різкої зміни довговічності конструкції. Призначення раціональної величини захисного шару бетону і підвищення міцності при розтягуванні бетону в захисному шарі, поряд із щільністю бетону, мають вирішальне значення для підвищення довговічності залізобетонних конструкцій.

3. З урахуванням розподілу температури по глибині ґрунту на прикладі м. Дніпро були отримані ізополя ушкодження захисного шару

бетону через 10, 50 та 100 років експлуатації в умовах сульфатної корозії при концентрації SO_4^{2-} 15, 30 та 50 г/л та виконано оцінювання зміни несучої здатності залізобетонної палі в умовах сульфатної корозії. Теоретична несуча здатність через 100 років експлуатації зменшується на 29–33,3 % при концентрації $SO_4^{2-}=15–50$ г/л відповідно.

4. В рамках довготривалих експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону на карбонатних заповнювачах проведено візуальне обстеження та випробування на стиск зразків через 30 років експонування в сульфатному розчині Na_2SO_4 з концентрацією 5 % та воді. Встановлено, що через 30 років випробувань міцність на стиск зразків на карбонатному піску в 1,7–3,4 рази вище, ніж зразків на кварцовому піску. Чисельний експеримент з оцінки довговічності бетону на карбонатних заповнювачах із урахуванням температури середовища показав, що використання в якості заповнювача карбонатного піску веде до зменшення прогнозованої глибини ушкодження на 22–23 %.

На основі аналізу чинних норм щодо захисту залізобетонних конструкцій від корозії сформульовано вимоги до заходів із забезпечення довговічності бетону в умовах сульфатної корозії залежно від характеристик агресивності середовища. На прикладі влаштування пальового фундаменту для малоповерхового індивідуального житлового будинку встановлено, що застосування бетону на карбонатному піску дозволяє знизити вартість бетону на його виготовлення на 8 %, порівняно з використанням бетону на кварцовому піску, що підтверджує ефективність запропонованих заходів із забезпечення необхідної довговічності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ Б В.2.6-145:2010 Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії [чинний від 2010-10-26]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 56 с.
2. СНиП 3.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии. Нормы проектирования [действует с 1986-01-01]. Госстрой СССР : Москва, 1986. 48 с.
3. Савицкий Н.В. Основы расчета надежности железобетонных конструкций в агрессивных средах. Дис...д-ра техн. наук: 05.23.01; 05.23.05. Днепропетровск, 1994. 410 с.
4. Савицкий Н.В. Прочность и деформативность железобетонных элементов, работающих в жидких сульфатных средах, агрессивных по признаку коррозии третьего вида. Дис...канд. техн. наук: 05.23.01; 05.23.05. Москва, 1986. 219 с.
5. Тытюк А.А. Долговечность железобетонных изгибаемых элементов в жидких сульфатных средах : автореф. дис...канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 1990. 23 с.
6. Краснюк Т.В. Оптимизация первичной защиты арматуры железобетонных конструкций в агрессивных газовых средах. Дисс. к.т.н. Днепропетровск., 2001. 169 с.
7. Матюшенко И.Н. Прогнозирование долговечности бетона в жидких агрессивных средах. Дис...канд. техн. наук: 05.23.05. Днепропетровск, 2008. 156 с.
8. Титюк А.А. Забезпечення довговічності бетону захисного шару в умовах атмосферних кліматичних впливів : автореф. дис...канд. техн. наук: 05.23.05. Дніпро, 2015. 24 с.
9. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. Москва : Стройиздат, 1981. 464 с.

10. Бабушкин В. И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона. Москва : Стройиздат, 1968. 187 с.
11. Дементьев Г. К. Коррозия неметаллических строительных материалов. Ч. 1. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инженер. гидрогеологии. Москва ; Ленинград : Гл. ред. строит. лит., 1935. 102 с.
12. Гузеев Е.А. Об учете параметров, определяющих стойкость железобетонных конструкций в агрессивных средах. *Коррозия и стойкость железобетона в агрессивных средах*. М.: НИИЖБ, 1980. С.4-9.
13. Гузеев Е.А., Алексеев С.Н., Савицкий Н.В. Учет агрессивных воздействий в нормах проектирования конструкций. *Бетон и железобетон*. 1992, № 10. С. 8-10.
14. Гузеев Е.А., Булгакова М.Г., Лемыш Л.Л. К вопросу оптимального проектирования железобетонных конструкций для агрессивных сред. *Способы повышения коррозионной стойкости бетона и железобетона*. М., НИИЖБ, 1988. С.13-19.
15. Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Пирадов К.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. Брест: БПИ, 1999. 217 с.
16. Иванов Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. М.: Транспорт, 1967. 176 с.
17. Иванов Ф.М., Любарская Г.В. Коррозия бетона в растворах сульфатов различной концентрации. *Коррозия бетона и железобетонных конструкций*. Ростов-на-Дону: Ростовский гос. ун-т, 1985. С.34-41.
18. Иванов Ф.М., Любарская Г.В., Чехний Г.В. Исследование сульфатостойкости бетона в сульфатно-бикарбонатных агрессивных средах. *Коррозионная стойкость бетона и железобетона в агрессивных средах*. М.: НИИЖБ, 1984. С.32-40.
19. Иванов Ф.М. О моделировании процессов коррозии бетонов. *Бетон и железобетон*. 1982, № 7. С. 45-46.

20. Москвин В. М., Иванов Ф. М., Алексеев С. Н., Гузеев Е. А. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты. Москва : Стройиздат. 1980. 533 с.
21. Полак А.Ф. Основы коррозии железобетона, математическое моделирование процесса с применением ЭВМ. Уфа : УНИ, 1986. 69с.
22. Полак А.Ф. Расчет долговечности железобетонных конструкций. Уфа : УНИ, 1983. – 116 с.
23. Гусев Б.В., Файвусович А.С., Степанова В.Ф., Розенталь Н.К. Математические модели процессов коррозии бетона. Москва : ТИМР, 1996. 104 с.
24. Рубецкая Т.В., Бубнова Л.С. Влияние хлористых солей на развитие сульфатной коррозии бетона. *Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред*. Москва : Стройиздат, 1975. С. 141-146.
25. Рубецкая Т.В., Любарская Г.В. Влияние вида заполнителей на скорость коррозионного процесса в бетоне при действии кислых агрессивных сред. *Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред*. Москва : НИИЖБ, Стройиздат, 1975. С.146-151.
26. Рунова Р. Ф., Троян В. В., Каменотрус С. В., Тихолаз Є. В.. Вплив хімічних добавок різної природи на кінетику карбонізації бетону. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2012. Вип. 43. С. 133-138. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs_2012_43_23.
27. Рунова Р. Ф. К вопросу о долговечности бетона для восстанавливаемых сооружений. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. 2006. Вып. 37. С. 396-407. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2006_37_72.

28. Троян В.В. Технологічні основи підвищення та прогнозування довговічності бетонів для масивних споруд : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05. - Київ, 2016. 39 с.
29. Троян В.В. Технологічні основи підвищення та прогнозування довговічності бетонів для масивних споруд. Київ : Інтерсервіс, 2017. 238 с.
30. Тихомирова М.Ф. Агрессивность сульфатных растворов в зависимости от вида катиона. *Бетон и железобетон*. 1982. №8. С. 43-44.
31. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений. Москва : Транспорт, 1966. 500 с.
32. Федосов С. В., Базанов С. М. Сульфатная коррозия бетона. Москва : АСВ, 2003. 192 с.
33. Sheinich L., Pryumachenko A. Sulfate resistant concrete with aluminosilicate additives. *Architecture, civil engineering, environment*. 2017. Vol.4. p. 101-106.
34. Шейніч Л.О., Приймаченко А.С. Моделювання процесу корозії високоміцних бетонів у сульфатному середовищі. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. № 2(6). С. 53-59.
35. Шейніч Л.О., Орловський В.М., Чудновський С.М. Нормативно-правові аспекти застосування добавок для бетонів і будівельних розчинів. *Наука та будівництво*. 2018. Вип. 18(4). С. 65-68.
36. Шишкин А. А., Нетеса Н. И., Нетеса А. Н. Определение рациональных составов бетонов низкой прочности. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. № 1/6 (97). URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/156599/159858>.
37. Нетеса Н.И. Влияние пор на напряженно-деформированное состояние бетона. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. Вип. 57. С. 322-327.
38. Нетеса Н. И. Снижение пустотности бетонных смесей подбором рационального зернового состава компонентов. *Вісник Дніпропетровського*

національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. 2007. Вип. 15. С. 200–204.

39. Алексеев С. Н., Иванов Ф. М., Модры С., Шиссль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. Москва : Стройиздат, 1990. 320 с

40. Иванов Ф. М., Розенталь Н. К. Классификация агрессивных сред и нормирование требований к бетонам в международной стандартизации. *Защита бетона и железобетона от коррозии*. М. НИИЖБ Госстроя СССР, 1990. С. 5-13.

41. Гузеев Е. А. Основы расчета и проектирования железобетонных конструкций повышенной стойкости в коррозионных средах : автореф. дис...канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 1980. 30 с.

42. Москвин В. М., Борисенко В. М. Влияние сжимающего напряжения на проницаемость бетона. *Тр. НИИЖБ: Коррозионностойкие бетоны и железобетонные конструкции*. 1981. С. 50-54.

43. Basista M., Węglewski W. Micromechanical modeling of sulphate corrosion in concrete: Influence of ettringite forming reaction. *Theoretical and Applied Mechanics*. 2008. Vol. 35, No. 1-3, pp. 29-52.

44. Zhao G, Shi M, Guo M, Fan H. Degradation Mechanism of Concrete Subjected to External Sulfate Attack: Comparison of Different Curing Conditions. *Materials*. 2020; 13(14):3179. <https://doi.org/10.3390/ma13143179>.

45. Clifton J.R., Bentz D.P., Pommersheim J.M. Sulfate diffusion in concrete. NISTIR 5361, Gaithersburg, NIST, 1994. 19 p.

46. Chauhan A., Sharma U. K. Influence of temperature and relative humidity variations on non-uniform corrosion of reinforced concrete. *Structures*. 2019. Vol. 19. P.296-308.

47. Sun C., Chen J., Zhu J., Zhang M., Ye J. A new diffusion model of sulfate ions in concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 39. P. 39-45.

48. Zhou Y., Tian H., Sui L., Xing F., Han N. Strength Deterioration of Concrete in Sulfate Environment: An Experimental Study and Theoretical Modeling. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015. Article ID 951209.

49. Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах / под ред. С. Е Алексеева. М.: Госстрой СССР. 1988. 132 с.

50. Шестоперов С. В. Долговечность бетона. Москва : Автотрансиздат, 1955. 479 с.

51. Ямбор Я. Оценка сульфатной агрессивности воды-среды для бетона. Бетон и железобетон. 1979. № 7. С. 38-38.

52. Prasad J., Jain D.K., Ahuja A.K. Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 2006. Vol. 7, № 3. P. 259-268.

53. Zhou Y., Tian H., Sui L., Xing F., Han N. Strength Deterioration of Concrete in Sulfate Environment: An Experimental Study and Theoretical Modeling. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015. Article ID 951209.

54. Торвальдсон Т. Солестойкость растворов и бетонов. *III Международный конгресс по химии цемента*. Москва : Госстройиздат, 1958, - С. 267-306.

55. Москвин В. М. Коррозия бетона. Москва: Гостройиздат, 1952. 341 с.

56. Горчаков Г. И. Прогнозирование стойкости бетона. *Коррозия бетона и повышение долговечности железобетонных конструкций*. 1985. С. 30-33.

57. Мещанский Н. А. Плотность и стойкость бетонов. Москва : Госстройиздт, 1951. 175 с.

58. Чеховский Ю. В. Понижение проницаемости бетона. Москва : Энергия, 1958. 192 с.
59. Изотов В.С. Влияние структуры бетона на его сопротивляемость физическим и химическим агрессивным воздействиям. Вестник Казанского технологического университета. 2014. Вып. 17, №. 18. С. 42-45.
60. Батяновский Э. И., Бондарович А. И., Рябчиков П. В. Влияние технологических факторов на проницаемость вибропрессованного бетона. *Строительная наука и техника*. 2006. №. 3. С. 18-26.
61. Bustos F., Martinez P., Videla C., Lopez M. Reducing concrete permeability by using natural pozzolans and reduced aggregate-to-pasteratio. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2015. Vol. 21(2). P. 165-176.
62. Yun-Yong Kim, Kwang-Myung Lee, Jin-Wook Bang, Seung-Jun Kwon. Effect of W/C Ratio on Durability and Porosity in Cement Mortar with Constant Cement Amount. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 2014, Article ID 273460.
63. Власычева Л. Г. Методика определения критического содержания сульфат-ионов в цементном камне. *Защита конструкций промышленных зданий и сооружений от агрессивных воздействий*. Ленинград. 1987. С. 32-37.
64. Тихомирова М.Ф., Власычева Л. Т. Оценка стойкости цементного камня по количеству поглощенного сульфата. *Повышение коррозионной стойкости железобетонных конструкций при морозной и сульфатной агрессии*. Челябинск, 1984.С. 21-22.
65. Латыпов В. М. О методе определения сульфатостойкости бетона. Повышение долговечности строительных конструкций в агрессивных средах. Уфа, 1987. С. 47-49.
66. Френкель И. М. Основы технологии тяжелого бетона. Москва : Стройиздат, 1966. 223 с.

67. Балалаев Г.А., Медведев В.М., Мощанский Н.А. Защита строительных конструкций от коррозии. Москва : Стройиздат, 1966. 224с.
68. Борисенко В.М. Прочностные и деформативные свойства бетона железобетонных конструкций, работающих в жидких агрессивных средах. Дис...канд. техн. наук: 05.23.05. Москва, 1978. 262 с.
69. Гузеев Е. А., Савицкий Н. В., Борисенко В. М. , Тытюк А.А. О прочности бетона при воздействии сульфатных растворов. Научно-техн. семинар "Защита подземных железо-бетонных конструкций от коррозии"; Тез. докл. Волгоград. 1990. С. 34-36.
70. Алексеев С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. Москва : Стройиздат, 1968. 231 с.
71. Матюшенко И.Н. Прогнозирование долговечности бетона в жидких агрессивных средах. Дис...канд. техн. наук: 05.23.05. Днепропетровск., 2008. 156 с.
72. Р.Б. Гарибов, И.Г. Овчинников, А.Н. Маринин. Моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций при совместном воздействии хлоридной коррозии и карбонизации. *Бетон и железобетон*. 2007, №6. с. 25-29.
73. А.И.Васильев, А.М.Подвальный. Прогноз коррозии арматуры железобетонных конструкций автодорожных мостов в условиях хлоридной агрессии и карбонизации. *Бетон и железобетон*. 2002, №6. с. 27-32.
74. С.Н. Леонович. Долговечность железобетонных конструкций при воздействии коррозии арматуры. URL: <https://nestor.minsk.by/sn/2005/08/sn50807.html>.
75. Bazant Z. P. Physical Model for Steel Corrosion in Sea Structures – Theory. *Journal of the Structural Division*. 1979. Vol. 105, Issue 6. P. 1137-1153.
76. Ferreira R.M. Probability based durability analysis of concrete structures in marine environment. PhD Thesis. Braga, Portugal, 2004. 339 p.

77. Liu, Y. Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures. PhD Thesis. USA, 1996. 128 pp.
78. Zheng J.J., Li C.Q., Lawanwisut W.. Modeling of Crack Width in Concrete Structures Due to Expansion of Reinforcement Corrosion. URL: https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC24723.pdf.
79. Zhou K., Martin-Pérez B., Lounis Z. Finite element analysis of corrosion-induced cracking, spalling and delamination of RC bridge decks. *1st Canadian Conference on Effective Design of Structures, Hamilton, Ont., July 10-13. 2005.* p. 187-196.
80. Bardah A. E., Savytskyi N. V., Shekhorkina S. E. Floating buildings review and design approaches. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Создание высокотехнологичных социозэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития. Днепропетровск, 2013. Вып. 68. С. 376-381.*
81. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Елисеева М. А., Новиченко Н. В. Факторы, влияющие на качество грунтобетонных. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Создание высокотехнологичных социозэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития. Днепропетровск, 2015. Вып. 81. С. 177–184.*
82. Bardah A. E., Koval' E. A., Savitskiy N. V. Energy saving and ecological aspects in housing construction. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. Дніпропетровськ, 2008. № 4-5. С. 51–52.*
83. Ракутумаву Ф.А. Надежность и долговечность железобетонных элементов из бетона на карбонатных заполнителях в жидких сульфатных средах. Дис...канд. техн. наук: 05.23.05. Днепропетровск, 1991. 228 с.
84. Crimer F.I. The durability of steel embedded in lightweight concrete. *Concrete. 1967. Vol. 1, № 4. P. 125-137.*

85. Савин Г.Н. Концентрация напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка, 1968. - 891 с.

86. Эванс Ю.Р. Коррозия, пассивность и защита металлов. Москва-Ленинград: Металлургиздат, 1941. - 886 с.

87. Цикерман Л.Я. Долгосрочный прогноз опасности грунтовой коррозии металлов. Москва : Недра, 1966. 175 с.

88. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов. Москва, Ленинград : Издательство АН СССР, 1947. 250 с.

89. Бардах А. Е., Никифорова Т. Д., Савицкий Н. В., Матюшенко И. Н., Назаренко А. О. Инженерная методика расчета прочности и деформаций железобетонных конструкций заглубленных зданий с учетом сульфатной коррозии бетона. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* Днепропетровск, 2010. Вып. 56. С. 299–304.

90. Бардах А. Е., Лаухина Л. Н., Савицкий Н. В. Функция условий работы железобетонных конструкций в агрессивных сульфатных средах. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения.* Днепропетровск, 2011. Вып. 58. С. 429–435.

91. Бардах О. Ю., Савицкий М. В., Никифорова Т. Д., Шляхов К. В. Інженерний метод розрахунку міцності згинальних залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* Днепр, 2017. Вып. 100. С. 48–55.

92. Bardakh O., Savytskyi M., Uncik S., Savytskyi A., Shevchenko T., Savytskyi O. Quantitative design methods for protection against corrosion of reinforced concrete structures during various stages of their lifecycle. Slovak

Journal of Civil Engineering. 2020. Vol. 28 (3). P. 8–12. URL: <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0018>.

93. Bardakh O., Savytskyi M., Savytskyi A., Shevchenko T., Chernets V. Quantitative design methods of corrosion protection the reinforced concrete structures at the stages of the lifecycle. *Proceedings of the enviBUILD 2019*. 2020. P. 153–158. URL: <https://doi.org/10.2478/9788395669699-025>.

94. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Матюшенко И. Н., Никифорова Т. Д. Расчет открытой пористости бетона при агрессивном воздействии сульфатов в зависимости от вида цемента. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2012. Вып. 65. С. 517–520.

95. V.Z. Antonopoulos. *Water Movement and Heat Transfer Simulations in a Soil under Ryegrass*. 2006, 95(1), 127–138.

96. Park K, Yang H, Lee BY, Kim D. Development of Shallow-Depth Soil Temperature Estimation Model Based on Thermal Response in Permafrost Area. *Applied Sciences*. 2018; 8(10):1886. <https://doi.org/10.3390/app8101886>.

97. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Richard G. Allen, Ivan A. Walter, Ronald L. Elliott, Terry A. Howell, Daniel Itenfisu, Marvin E. Jensen, Richard L. Snyder. 2005. URL: <https://doi.org/10.1061/9780784408056>.

98. Atwan A., Kasim N., Shneishil A. Calculation of Underground Soil Temperature for the Installation of Ground Heat Exchange Systems in Baghdad. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/329044575_Calculation_of_Underground_Soil_Temperature_for_the_Installation_of_Ground_Heat_Exchange_Systems_in_Baghdad.

99. FAO Irrigation and Drainage Paper № 56 Crop Evapotranspiration. <http://www.climasouth.eu/sites/default/files/FAO%2056.pdf>.

100. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія [чинні від 2011-01-11]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 130 с.

101. Никифорова Т.Д. Научные основы и методы расчета конструкций заглубленных зданий с учетом внешних воздействий. Дис...д-ра техн. наук: 05.23.01. - Днепропетровск, 2016. 346 с.

102. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [чинні від 2011-01-07]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

103. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для сооружений (EN 1992-1-1:2004, IDT) [чинні від 2013-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 152 с.

104. Агаджанов В.И. Экономика повышения долговечности и коррозионной стойкости строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1988. 144с.

105. Савицкий Н.В., Матюшенко И.Н., Никифорова Т.Д., Лаухина Л.Н. Моделирование процессов коррозии арматуры железобетонных конструкций в агрессивных средах. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения»*. Днепропетровск : ПГАСА, 2006. С. 425–430.

106. Гузеев Е.А., Савицкий Н.В., Борисенко В.М., Тытюк А.А. О прочности бетона при воздействии сульфатных растворов. *Тезисы докладов НИИЖБ. Научно-технический семинар «Защита подземных железобетонных конструкций от коррозии»*. 1990. С. 34-36.

107. Гусев Б.В., Файвусович А.С., Степанова В.Ф., Розенталь Н.К. Математические модели процессов коррозии бетона. Москва : ТИМР, 1996. 104 с.

108. Кривенко П. В. Современные проблемы долговечности бетона: состояние и перспективы. *Будівельні конструкції*. 2000. Вип. 38. С. 15-27.

109. Спатаев И.О. Прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов из щелочесиликатного бетона в жидких хлоросодержащих агрессивных средах. Дисс. к.т.н. – М., 1989. – 179 с.

110. Полак А.Ф., Гельфман Г.Н., Яковлев В.В. Антикоррозионная защита строительных конструкций на химических и нефтехимических предприятиях. Уфа: Башкирское книжное издательство, 1980. 80 с.

111. Шехоркина С.Е. Рациональное проектирование конструкций малоэтажных жилых зданий на воде. Дис...канд. техн. наук: 05.23.01. Днепропетровск, 2013. 168 с.

112. Бардах А.Е., Савицкий Н.В., Шехоркина С.Е., Амир Алани, Карим Лимам. Экспериментальное исследование коррозионной стойкости бетона на карбонатных заполнителях. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2013. Вып. 69. С. 446-450.

113. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Бауск Е. А., Матюшенко И. Н., Несин А. А., Сопильняк А. М. Усиление строительной конструкции здания РДЭС энергоблоков № 1, 2 РАЭС. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2014. Вып. 77. С. 177–181.

114. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Елисеева М. А., Кузьмин Г. И., Новиченко Н. В., Евсеев Е. О. Прочность грунтобетонов в зависимости от состава смеси. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-*

гражданского, промышленного и транспортного назначения. Днепропетровск, 2015. Вып. 82. С. 179–186.

115. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Никифорова Т. Д. Новая конструкция поперечного армирования в зоне продавливания монолитной плиты плоского перекрытия колонной. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* Днепропетровск, 2007. Вып. 43. С. 477–481.

116. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Никифорова Т. Д., Шляхов К. В., Несин А. А. Вариантное проектирование сборно-монолитного каркаса многоэтажных зданий социального назначения. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* Днепропетровск, 2008. Вып. 47. С. 534–537.

117. Методология создания устойчивых экопоселений в Украине / Бабенко М. М., Бардах А. Е., Бондаренко О. И., Данишевский В. В., Коваль А. С., Конопляник А. Ю., Никифорова Т. Д., Николаенко С. Н., Мирошниченко К. К., Савицкий А. Н., Савицкий Н. В., Шатов С. В., Шевченко Т. Ю., Шехоркина С. Е.; под. общ. ред. Н. В. Савицкого. Днепр: Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры, РоялПринт, 2017. 304 с.

118. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3Д-друку будівельних об'єктів: колективна монографія / М. Савицький, Ш. Айріх, І. З. Халаф, С. Дукач, С. Унчік, Г. Євсєєва, Т. Нікіфорова, С. Шатов, О. Адегов, М. Бабенко, Є. Бринзін, О. Голубченко, О. Зінкевич, С. Іванцов, О. Коваль, О. Конопляник, М. Ляховецька–Токарева, М. Махінько, І. Перегінець, О. Савицький, А. Титюк, Є. Юрченко, Т. Шевченко, С. Шехоркіна, К. Шляхов, О. Бондаренко, О. Бардах, М. Бордун, О. Денисенко, О. Лясота, А. Савицький, Є. Соловійова, В. Спірідоненков, В. Чернець; за заг. ред. М. Савицького. Дніпро: ФОП Удовиченко О.М., 2019. 233 с.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бардах А. Е., Никифорова Т. Д., Савицкий Н. В., Матюшенко И. Н., Назаренко А. О. Инженерная методика расчета прочности и деформаций железобетонных конструкций заглубленных зданий с учетом сульфатной коррозии бетона. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* Днепропетровск, 2010. Вып. 56. С. 299–304.

2. Бардах А. Е., Лаухина Л. Н., Савицкий Н. В. Функция условий работы железобетонных конструкций в агрессивных сульфатных средах. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения.* Днепропетровск, 2011. Вып. 58. С. 429–435.

3. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Матюшенко И. Н., Никифорова Т. Д. Расчет открытой пористости бетона при агрессивном воздействии сульфатов в зависимости от вида цемента. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* Днепропетровск, 2012. Вып. 65. С. 517–520.

4. Bardah A. E., Savytskyi N. V., Shekhorkina S. E. Floating buildings review and design approaches. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Создание высокотехнологичных социоэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития.* Днепропетровск, 2013. Вып. 68. С. 376-381.

5. Бардах А.Е., Савицкий Н.В., Шехоркина С.Е., Амир Алани, Карим Лимам. Экспериментальное исследование коррозионной стойкости

бетона на карбонатных заполнителях. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2013. Вып. 69. С. 446-450.

6. Бардах О. Ю., Савицкий М. В., Нікіфорова Т. Д., Шляхов К. В. Инженерный метод розрахунку міцності згинальних залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепр, 2017. Вып. 100. С. 48–55.

7. Bardakh O., Savytskyi M., Uncik S., Savytskyi A., Shevchenko T., Savytskyi O. Quantitative design methods for protection against corrosion of reinforced concrete structures during various stages of their lifecycle. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 28 (3). P. 8–12. URL: <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0018> (*Web of Science*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Bardakh O., Savytskyi M., Savytskyi A., Shevchenko T., Chernets V. Quantitative design methods of corrosion protection the reinforced concrete structures at the stages of the lifecycle. *Proceedings of the enviBUILD 2019*. 2020. P. 153–158. URL: <https://doi.org/10.2478/9788395669699-025>.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Никифорова Т. Д. Новая конструкция поперечного армирования в зоне продавливания монолитной плиты плоского перекрытия колонной. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2007. Вып. 43. С. 477–481.

10. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Никифорова Т. Д., Шляхов К. В.,

Несин А. А. Вариантное проектирование сборно-монолитного каркаса многоэтажных зданий социального назначения. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2008. Вып. 47. С. 534–537.

11. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Бауск Е. А., Матюшенко И. Н., Несин А. А., Сопильняк А. М. Усиление строительной конструкции здания РДЭС энергоблоков № 1, 2 РАЭС. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2014. Вып. 77. С. 177–181.

12. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Елисеева М. А., Кузьмин Г. И., Новиченко Н. В., Евсеев Е. О. Прочность грунтобетонов в зависимости от состава смеси. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2015. Вып. 82. С. 179–186.

13. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Елисеева М. А., Новиченко Н. В. Факторы, влияющие на качество грунтобетонов. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Создание высокотехнологичных социоэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. Днепропетровск, 2015. Вып. 81. С. 177–184.

14. Bardah A. E., Koval' E. A., Savitskiy N. V. Energy saving and ecological aspects in housing construction. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпропетровськ, 2008. № 4-5. С. 51–52.

15. Методология создания устойчивых экопоселений в Украине / Бабенко М. М., Бардах А. Е., Бондаренко О. И., Данишевский В. В.,

Коваль А. С., Конопляник А. Ю., Никифорова Т. Д., Николаенко С. Н., Мирошниченко К. К., Савицкий А. Н., Савицкий Н. В., Шатов С. В., Шевченко Т. Ю., Шехоркина С. Е.; под. общ. ред. Н. В. Савицкого. Днепр: Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры, РоялПринт, 2017. 304 с.

16. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3Д-друку будівельних об'єктів: колективна монографія / М. Савицький, Ш. Айріх, І. З. Халаф, С. Дукат, С. Унчік, Г. Євсєєва, Т. Нікіфорова, С. Шатов, О. Адегов, М. Бабенко, Є. Бринзін, О. Голубченко, О. Зінкевич, С. Іванцов, О. Коваль, О. Конопляник, М. Ляховецька–Токарева, М. Махінько, І. Перегінець, О. Савицький, А. Титюк, Є. Юрченко, Т. Шевченко, С. Шехоркіна, К. Шляхов, О. Бондаренко, О. Бардах, М. Бордун, О. Денисенко, О. Лясота, А. Савицький, Є. Соловйова, В. Спірідоненков, В. Чернець; за заг. ред. М. Савицького. Дніпро: ФОП Удовиченко О.М., 2019. 233 с.

ДОДАТОК Б**Довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи**

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Ректор
ДВНЗ «НЦАБА», д.т.н., професор

М.В. Савицький

17 грудня 2020 р.

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результати наукових досліджень, що викладені у дисертаційній роботі: «Довговічність бетону в умовах дії сульфатних розчинів і температур» Бардаха О.Ю. використовуються в навчальному процесі Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» при підготовці здобувачів вищої освіти за напрямком 192 – Будівництво та цивільна інженерія, спеціальність «Промислове та цивільне будівництво» при викладанні спеціального курсу «Раціональне проектування залізобетонних конструкцій».

Декан факультету
«Будівельний»,
д.т.н., проф.

Т. Д. Нікіфорова

Зав. каф. ЗБіКК,
к.т.н., доц.

О. Ю. Конопляник

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Ректор

ДВНЗ «ПДАБА», д.т.н., професор

М.В. Савицький

19 грудня 2020 р.

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результати наукових досліджень, що викладені у дисертаційній роботі: «Довговічність бетону в умовах дії сульфатних розчинів і температур» Бардаха О.Ю. є складовою розділів держбюджетних науково-дослідних робіт, що фінансувались Міністерством освіти і науки України:

1. «Створення методології раціонального проектування ресурсозберігаючих архітектурно-конструктивно-технологічних систем для будівництва доступного житла» (номер держреєстрації 0111U000455, 2011-2012 рр.)

2. «Розробка наукових засад створення високотехнологічних соціоекокомплексів в Україні на основі концепції стійкого розвитку» (номер державної реєстрації №0113U000129, 2013-2014 рр.)

3. «Розробка наукових засад трансформації будівель та житлових комплексів сучасних великих міст України на основі інноваційних екотехнологій» (номер державної реєстрації №0115U000218, 2015-2016 рр.).

4. «Розробка наукових основ інноваційної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку» (номер державної реєстрації № 0119U100608, 2019-2020 рр.).

Начальник НДЧ
ДВНЗ «ПДАБА»,
к.т.н., доцент

А.О. Титюк